

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. 2 № 2

**Севастополь
2016**

**Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь:
ФГАОУ ВО СевГУ, 2016. – Т. 2. - № 2. – 98 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», «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», «Экологическая безопасность», «Химические технологии атомных станций».

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:

Кирияченко В.А. (главный редактор), к.т.н., профессор;
Омельчук Ю.А. (заместитель главного редактора), к.х.н., доцент;
Федорова С.А. (ответственный секретарь), к.пед.н., доцент;
Сафонов В.А., д.т.н., профессор; *Пухлий В.А.*, д.т.н., профессор;
Пучков В.Н., д.т.н., профессор; *Акимов А.М.*, д.т.н., профессор;
Федоровский К.Ю., д.т.н., профессор; *Олейников А.М.*, д.т.н., профессор;
Тимощенко А.И., д.т.н., профессор; *Карницкий А.Б.*, д.т.н., профессор;
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

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> Движение нерелятивистского объекта в искривленном пространстве ядерного реактора	5
<i>Качур С.А., Кошевская Е.М.</i> Статистический метод диагностики пространственного распределения энергии в активной зоне ядерного реактора	11
<i>Коваль В.А., Мирошниченко С.Т., Софийский И.Ю.</i> Методика определения оптимальных значений параметров гидромеханического измерительного преобразователя	17
<i>Пухлий В.А., Мирошниченко С.Т., Журавлев А.А.</i> Исследование напряженно-деформированного состояния рабочих колес турбодетандеров	22
<i>Свириденко И.И.</i> Особенности организации аварийного отвода теплоты от СПОТ ПГ реакторной установки АЭС с ВВЭР	32
Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии	41
<i>Канов Л.Н.</i> Стабилизация режима кластера ветроэлектрических установок в локальной сети электроснабжения	41
<i>Марончук И.И., Парфёнов А.А., Широков И.Б.</i> Проектирование и эксплуатация маломощной солнечной энергоустановки	47
Экологическая безопасность	52
<i>Гавриш В.М., Баранов Г.А., Матюхина П.В.</i> Разработка биопротектора на основе культуры тионовых бактерий рода <i>Thiobacillus</i>	52
<i>Климова Ю.Ю., Косовская М.А.</i> Техногенное аэрозамыснение урбанизированной прибрежной зоны Севастополя	57
<i>Пухлий В.А., Журавлев А.А., Померанская А.К., Пухлий П.В.</i> Очистка сточных вод от метанола и ацетона	68
<i>Федорова С.А., Безбородова Д.И.</i> Исследование влияния ионов меди, никеля, кальция, магния и рН на определение железа(III) в питьевой воде	78
Химические технологии атомных станций	83
<i>Ерофеев В.А., Черкашина Н.И., Сулавко Д.Ю., Культенко Э.А.</i> Изучение механизма процессов сорбции радионуклидов на ионообменных лигнинных сорбентах	83
<i>Черкашина Н.И.</i> Химико-технологический процесс получения сорбента на основе природного материала	91

CONTENTS

Heating and Nuclear Power Plants	5
<i>Kachur S.A.</i> Nonrelativistic object movement in deflected space of nuclear reactor	5
<i>Kachur S.A., Koshevskya E.M.</i> Statistical diagnostics method of spatial energy distribution in active zone of nuclear reactor	11
<i>Koval V.A., Miroshnichenko S.T., Sofiysky I.J.</i> Definition optimum values parameters procedure of hydromechanical measuring converter	17
<i>Pukhly V.A., Miroshnichenko S.T., Zhuravlev A.A.</i> study of stress-strain state of impellers expanders	22
<i>Sviridenko I.I.</i> Use of ambient water and air as the final heat repository for PRHRS SG of WWER Power Units	32
Alternative and Renewable Power Sources	41
<i>Kanov L.N.</i> Stabilization regime cluster of wind energetic plants in local power supply network	41
<i>Maronchuk I.I., Parfenov A.A., Shirokov I.B.</i> Design and operation of low-power solar power plant	47
Environmental Safety	52
<i>Gavrish V.M., Baranov G.A., Matyuhina P.V.</i> Development bioprotector based on thiobacteria culture from thiobacillus genus	52
<i>Klimova Yu.Yu., Kosovskaya M.A.</i> Technogenic aero pollution of coastal urbanized territories of Sevastopol	57
<i>Pukhly V.A., Zhuravlev A.A., Pomeranskaya A.K., Pukhly P.V.</i> Sewage treatment from methanol and acetone	68
<i>Fedorova S.A., Bezborodova D.I.</i> Research influence of copper, nickel, calcium, magnesium ions and pH on determination of iron (III) in drinking water	78
Applied Chemistry for Nuclear Power Plants	83
<i>Erofeev V.A., Cherkashina N.I., Sulavko D.Y., Kulenko E.A.</i> Study mechanism of sorption radionuclides processes on ion-exchange lignin sorbents	83
<i>Cherkashina N.I.</i> Chemical-technological process of obtaining a sorbent based on natural material	91

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.039.56

Движение нерелятивистского объекта в искривленном пространстве ядерного реактора

С.А. Качур

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

Статья поступила 20.04.2016 г.; после доработки 22.04.2016 г.

Аннотация

Выдвинута гипотеза, что при определенных условиях нерелятивистский объект в пространстве монополя ядерного реактора можно рассматривать как ультрарелятивистскую частицу. Предложены соотношения для определения параметров такого объекта, а именно частота излучения и скорость при заданной кривизне пространства монополя ядерного реактора.

Ключевые слова: ядерный реактор, мгновенная критичность, черная дыра, движение ультрарелятивистской частицы, пространственно-временной монополь.

Movement of Nonrelativistic Object in the Distorted Space of Nuclear Reactor

S.A. Kachur

Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 20.04.2016 y.; received in final form 22.04.2016 y.

Abstract

Hypothesis is given, that at certain terms nonrelativistic object in space monopole of nuclear reactor it is possible to be examined as ultrarelativist particle. Ratio for determination of such object parameters are offered, namely radiation frequency and speed at the set curvature of monopole space of nuclear reactor.

Keywords: nuclear reactor, instantaneous criticism, black hole, ultrarelativist particle movement, spatio-temporal monopole

Введение

Предлагаемая статья является продолжением работ [1-7] и направлена на исследование пространственно-временных эффектов, порожденных ядерным реактором в состоянии близком к мгновенной критичности.

Пространство и время могут деформироваться и искривляться в ответ на присутствие вещества или энергии. Такие деформации структуры пространства и времени передают силу тя-

жести из одного места в другое. По отдельности квантовая механика и общая теория относительности экспериментально подтверждены, однако еще ни разу не исследовался случай, когда можно было бы проверить обе теории одновременно. Поскольку квантовые эффекты заметны лишь в малых масштабах, а для того, чтобы стали заметны эффекты общей теории относительности, требуются большие массы. Объединить оба условия можно лишь при каких-то экстраординар-

ных обстоятельствах. Такими обстоятельствами можно считать внешнее терагерцовое воздействие на систему ядерных реакторов [7].

В качестве альтернативы гипотезе микроклеточному, с минимально возможным уровнем энергии, строению пространства предлагается гипотеза о пространстве как совокупности взаимосвязанных и взаимопроникающих макроклеток в виде пространственно-временных монополей, образованных источниками сверхвысоких энергий, таких как ядерный реактор, ядро Земли, Солнце, черные дыры и т.д. Такое представление позволяет объяснить «гравитационные аномалии» [7].

Пространственно-временной монополь – 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 [7].

Для ядерного реактора внешними факторами являются принудительное изменение массы ядерного топлива, а именно, обогащенного урана, и изменение частот внешних источников электромагнитного излучения. Для космических объектов – естественное изменение массы объекта и появление иных источников электромагнитного излучения при движении объекта по своей траектории. Кроме того, в случае двойной системы ядра (например, система двух реакторов с радиоизлучателем, двойная система черных дыр с пульсаром) возможно перераспределение энергии внутри системы.

Использование искривления пространства космических объектов является одним из основных факторов, определяющих возможность осуществления полетов в дальнем космосе, аналогично применению гравитации при движении космических аппаратов внутри солнечной системы. Исследование пространственно-временных эффектов ядерного реактора вблизи мгновенной критичности позволяет разработать имитационные модели движения космических аппаратов в искривленном пространстве.

Два пути изменения состояния реактора определяют разные виды пространственно-временных эффектов, получаемых в результате воздействия на реактор вблизи мгновенной критичности высокочастотными электромагнитными (терагерцовыми) излучениями. Для случая высоких начальных частот изменения реактивности характер пространственно-временного монополя ядерного реактора описывается как

черная дыра, то есть скрытая сингулярность. При низких начальных частотах изменения реактивности пространственно-временной монополь реактора может быть рассмотрен как голая сингулярность [1].

Наибольший интерес для имитации движения нерелятивистского объекта в искривленном пространстве представляет случай скрытой сингулярности, т.е. черной дыры.

Обсуждение вопросов, связанных с возможными наблюдательными проявлениями черных дыр, привлекло внимание к задаче движения частиц и физических полей в пространстве-времени стационарных черных дыр. К настоящему времени эта задача, носящая в основном математический характер и связанная с интегрированием уравнений геодезических и построением разложения по собственным функциям инвариантных волновых операторов в метрике Керра, в значительной части решена [8-10].

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – создание модели движения нерелятивистского объекта вблизи черной дыры, созданной системой ядерных реакторов, находящихся в состоянии близком к мгновенной критичности.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- 1) выполнить анализ моделей движения объекта в пространстве-времени стационарных черных дыр;
- 2) описать модель движения нерелятивистского объекта, способного перемещаться в пространстве черной дыры, создаваемой системой ядерных реакторов.

Анализ моделей движения объекта в пространстве-времени стационарных черных дыр

Анализ существующих моделей движения частиц основан на рассмотрении классических представлений, изложенных в [8-10]. Целью данного анализа является подбор материала, который может быть использован для построения модели движения нерелятивистского объекта в искривленном пространстве реактора.

Будем рассматривать движение частиц во внешнем пространстве по отношению к системе отсчета Шварцшильда по часам наблюдателя на бесконечности. Используется сферическая пространственная система координат (r, θ, φ) . Так

как поле тяготения сферически-симметрично, то траектория частицы плоская, и можно считать, что она лежит в плоскости $\theta = \pi/2$. Уравнения движения имеют вид [10]

$$\left(\frac{dr}{cdt}\right)^2 = \frac{(1-r_g/r)^2[\tilde{E}^2 - (1-r_g/r)(1+\tilde{L}^2 r_g^2/r^2)]}{\tilde{E}^2}, \quad (1)$$

$$\frac{d\phi}{cdt} = \frac{(1-r_g/r)(1-r_g/r)\tilde{L}r_g}{\tilde{E}r^2}, \quad (2)$$

где $\tilde{E}$ – удельная энергия частицы (на единицу собственной энергии mc^2 , m – масса частицы), r_g – радиус сферы Шварцшильда, $\tilde{L}$ – удельный угловой момент (измеренный в единицах mcr_g). Обе величины сохраняются при движении. Физическая скорость частицы v , измеренная находящимся рядом наблюдателем по его часам t , непосредственно связана с энергией $\tilde{E}$:

$$\tilde{E}^2 = (1-r_g/r)(1-v^2/c^2)^{-1}. \quad (3)$$

Приравняв dr/dt нулю, можно найти точки наибольшего приближения частицы к черной дыре и наибольшего удаления от нее. Правая часть (1) равна нулю, когда выполняется следующее равенство, определяющее эффективный потенциал,

$$\tilde{E}^2 = (1-r_g/r)(1+r_g^2/r^2). \quad (4)$$

Кривая (4) для фиксированного L изображена на рис. 1.

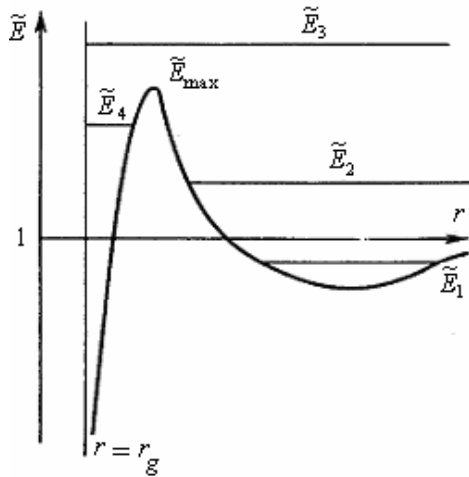


Рис. 1. Эффективный потенциал черной дыры

Движение частицы происходит с постоянной удельной энергией и изображается на рис. 1 горизонталью. Пересечение горизонтали с эффективным потенциалом определяет точки наибольшего приближения к черной дыре и наибольшего удаления от нее. Горизонталь $\tilde{E}_1 < 1$ отвечает движению в ограниченной области

пространства между r_1 и r_2 – аналог эллиптического движения ньютоновской теории (рис. 2, а). Горизонталь $\tilde{E}_2 > 1$ соответствует приходу частицы из бесконечности и уходу снова на бесконечность – аналог гиперболического движения (рис. 2, б). Горизонталь $\tilde{E}_3$ не пересекает потенциальной кривой, проходя выше ее максимума $\tilde{E}_{\max}$, и соответствует падению частицы в черную дыру – гравитационный захват (рис. 2, в). Гравитационный захват возможен из-за наличия максимума в эффективном потенциале. Такого максимума нет на соответствующей кривой ньютоновской теории. Горизонталь $\tilde{E}_4$ может лежать как ниже, так и выше единицы в случае $\tilde{E}_{\max} > 1$, простираясь от r_g до пересечения с кривой $\tilde{E}(r)$. Она изображает движение частицы, которая, например, сначала удаляется от черной дыры, достигает $r_{\max}$ (в точке пересечения $\tilde{E}_4$ и $\tilde{E}(r)$), а затем вновь падает к черной дыре и поглощается ею (рис. 2, г).

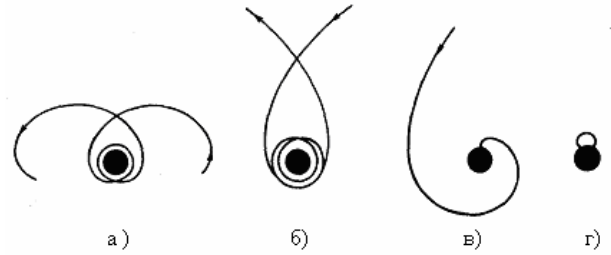


Рис. 2. Траектории частицы с энергиями:

а) – $\tilde{E}_1$, б) – $\tilde{E}_2$, в) – $\tilde{E}_3$, г) – $\tilde{E}_4$

Частным случаем движения частицы вокруг черной дыры является движение по окружности. При этом тождественно $dr/dt = 0$. Положение точки в минимуме кривой эффективного потенциала соответствует устойчивому движению, в максимуме – неустойчивому.

Движение ультрарелятивистской частицы соответствует в (1), (2) пределу $v \rightarrow c$, и поэтому $\tilde{E} \rightarrow \infty$ и $\tilde{L} \rightarrow \infty$. Отношение $\tilde{E}/\tilde{L}$ всегда равно отношению r_g/b , где b – прицельное расстояние частицы на бесконечности. Учтя это, получаем вместо (1), (2)

$$\left(\frac{dr}{cdt}\right)^2 = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right)^2 \left[1 - \frac{b^2}{r^2} \left(1 - \frac{r_g}{r}\right)\right] \quad (5)$$

$$\frac{d\phi}{cdt} = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right) \frac{b}{r^2}. \quad (6)$$

Формулы (5), (6) описывают искривление траектории ультрарелятивистской частицы и луча света, движущихся вблизи черной дыры.

Приравняв квадратную скобку в (5) нулю, получаем положение точек экстремумов траектории как функцию радиуса r . Соответствующая кривая $b(r)$ показана на рис. 3. Знак b зависит от направления облета; будем считать b положительным. Движение ультрарелятивистской частицы с заданным b изображается на этом рисунке горизонталью $b = \text{const}$.

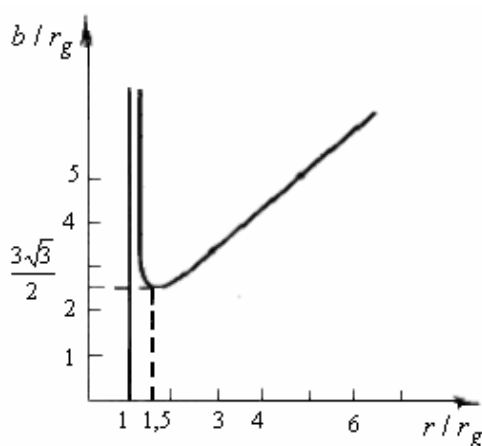


Рис. 3. Положение экстремумов по r траектории ультрарелятивистской частицы в зависимости от прицельного расстояния b

Частица приближается к черной дыре, огибает ее на минимальном расстоянии, соответствующем точке пересечения $b = \text{const}$ с правой ветвью кривой $b(r)$, и снова улетает в бесконечность. Если пересечение происходит вблизи минимума $b_{\min} = 3\sqrt{3}r_g/2$, то частица может сделать много оборотов, прежде чем улетит в бесконечность. Точно минимуму кривой $b(r)$ соответствует (неустойчивое) движение по кругу с радиусом $r = 1,5 r_g$ со скоростью $v = c$. Левая ветвь $b(r)$ на рис. 3 соответствует максимальному удалению ультрарелятивистской частицы, движущейся вблизи черной дыры, которая сначала удаляется от нее до $r < 1,5r_g$, а потом снова падает на нее. При этом параметр b не имеет прямого смысла прицельного расстояния на бесконечности, так как частица никогда на бесконечность не уходит. Этот параметр может быть выражен при заданной координате r через тангенс угла ψ между траекторией частицы и направлением на центр черной дыры:

$$b = \frac{r |tg \psi|}{\sqrt{(1 - r_g/r)(1 + tg^2 \psi)}}. \quad (7)$$

Если ультрарелятивистская частица подлетает к черной дыре из бесконечности и параметр b меньше критического значения $b_{\min} = 3\sqrt{3}r_g/2$, то такая частица попадает в черную дыру.

Модель движения нерелятивистского объекта в двойной системе черных дыр, которая имитируется системой ядерных реакторов

Пространственно-временной монополю имеет дискообразную форму с системой реакторов (реактором) в центре. Существует некоторая аналогия структуры между пространственно-временным монополем реактора и сверхтяжелым монополем (GUT-монополем) [7]. Монополь реактора как монополю черной дыры включает четыре зоны: центральная область – зона коллапса; зона сжатия с замедлением времени в соответствии с общей теорией относительности (ОТО); зона задержки времени, которая позволяет вернуться во времени назад; зона расширения с ускорением течения времени в соответствии с ОТО.

Траектория движение объекта на малых скоростях в монополе ядерного реактора в зоне сжатия аналогично траектории светового луча в черной дыре.

Опишем пространственные эффекты, вызванные внешним терагерцовым воздействием на реактор P_1 , входящий в двойную систему реакторов (P_1, P_2). Для того, чтобы появился пространственно-временной монополю системы реакторов необходимо наличие излучателя Π электромагнитных волн, работающего на частоте ядерного магнитного резонанса ω_{MP} и расположенного под углом $\alpha = 45^\circ$ к линии, связывающей два реактора, как показано на рис. 4.

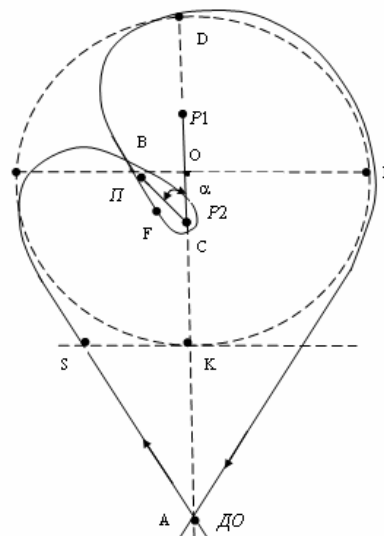


Рис. 4. Траектория движения объекта относительно экспериментальной системы

Такое расположение радиоизлучателя необходимо для обеспечения входа (точка А) в монополю и выхода в исходное пространство (точка В) движущегося объекта (ДО). Расстояния (СВ) и (ОС) на рис. 4 соответствуют в квантовой модели радиусу R_1 , (СК) – R_2 , (СА) – R_3 .

Границы уровней квантования пространства (1 – сжатия, 2 – задержки, 3 – расширения) минимального монополя реактора определяются следующим образом

$$R_1 = \frac{c}{2\omega_{\text{MP}}},$$

$$R_2 = R_1 k_p,$$

$$R_3 = 2R_2,$$

где k_p – коэффициент искривления пространства.

Определим соответствие между обозначениями формул (1)-(7) и параметрами модели монополя: $r_g \equiv R_1$, $\psi \equiv \alpha$. Траектория движения объекта на рис. 4 представлена для $r \equiv R_3$, т.е. для случая, когда точка входа объекта в монополю монополя системы реакторов лежит на его границе, и движение объекта может быть описано как движение ультрарелятивистской частицы. Различные варианты траектории объекта определяются формулами ((5)-(7)) и точкой входа в монополю, которой задается r .

Выдвигается гипотеза, что при определенных условиях нерелятивистский объект в пространстве монополя ядерного реактора можно рассматриваться как ультрарелятивистскую частицу. Определим параметры, характеризующие такой объект.

Для объекта, движущегося в пространственно-временном монополе типа «черная дыра» на скорости значительно меньше световой, существует возможность покинуть черную дыру при условии, если он воспринимается (идентифицируется) пространством как свет.

Представляется, что подобный отклик монополя на «нарушителя границ» будет в случае, когда частотные характеристики объекта могут компенсировать отсутствие световой скорости.

Движение объекта в пространстве будет эквивалентно движению фотона при выполнении следующего соотношения

$$c = \frac{\omega^2}{\omega_c^2} V_{\text{max}}, \quad (8)$$

где V_{max} – максимальная скорость объекта при его частоте ω , позволяющая покинуть черную дыру; ω_c – частота видимого (оптического) излучения ($\omega_c = 429 \text{ ТГц} \div 750 \text{ ТГц}$); c – скорость света.

Тогда, исходя из (8) известная формула ко-

эффициента изменения времени в ОТО (коэффициента искривления пространства k), принимает вид

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}} \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\omega^4 V^2}{\omega_c^4 c^2}}}. \quad (9)$$

Поскольку коэффициент искривления пространства реактора соответствует коэффициента искривления пространства k (9), можно записать соотношение (10).

Ниже представлен конечный результат вывода

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\omega^4 V^2}{\omega_c^4 c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{k_1(1 + 10F\beta'\omega'_0)} \right)^2}}, \quad (10)$$

где

$$k_1 \approx \frac{T_{\text{НК}} + \Delta T_{\text{НК}}}{T_{\text{НК}}},$$

$$\left(\frac{\Delta T_{\text{НК}}}{T_{\text{НК}}} \right)_{\text{max}} = \frac{\alpha}{4},$$

$$F = \frac{1}{\omega_{\text{MP}}} \cdot \frac{\beta_6}{\beta} \omega_2,$$

$$\omega_2 = k_{\text{np}} \cdot \frac{c}{\ln(c^2)},$$

$$\omega'_0 = k_{\text{np}} \cdot \frac{\alpha^3}{2\pi} \frac{c}{\ln(c^2)},$$

$$V = k' \frac{T_{\text{К}}}{T_{\text{НК}}},$$

где V – допустимая скорость движения объекта в сжатом пространстве; $T_{\text{К}}$ – температурой кипения теплоносителя; $T_{\text{НК}}$ – температурой начала поверхностного кипения теплоносителя; F – частотный коэффициент ядерного магнитного резонанса; k_1 – температурный коэффициент усиления; β' – доля запаздывающих нейтронов по отношению к полному числу нейтронов для ^{239}Pu ; k' – коэффициент согласования размерности.

Для простоты изложения примем в (10) $k_1 = 1$ и $F = 1$. В этом случае частота нерелятивистского объекта для его движения в пространстве монополя ядерного реактора должна определяться формулой

$$\omega = \sqrt{\frac{c\omega_c^2 T_{\text{НК}}}{k'T_{\text{К}}(1 + 10\beta'\omega'_0)}} \approx \sqrt{\frac{c\omega_c^2 T_{\text{НК}}}{k'T_{\text{К}}}}. \quad (11)$$

При $\omega_c = 5 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$, $T_{\text{НК}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{К}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ рассчитанное по формуле (11) значение частоты $\omega \approx 7,2 \cdot 10^{18} \text{ Гц}$ находится на границе жесткого рентгеновского и мягкого γ -излучения. Скорость объекта в этом случае мала и составляет $V \approx 1,4 \text{ /с}$.

Полученный результат коррелируется с параметрами объекта, участвующего в создании монополя ядерного реактора [2]. Представляется, что при таких значениях параметров объекта модель его движения аналогична модели движения частицы в пространстве-времени стационарных черных дыр.

Заключение

Выдвинута гипотеза, что при определенных условиях нерелятивистский объект в пространстве монополя ядерного реактора можно рассматриваться как ультрарелятивистскую частицу. Предложены соотношения для определения параметров такого объекта, а именно частота излучения и скорость при заданной кривизне пространства монополя ядерного реактора. В этом случае модель движения объекта в пространстве монополя описывается известными моделями движения частиц в пространстве-времени стационарных черных дыр.

Найдены значения параметров нерелятивистского объекта, осуществляющего движение в пространстве черной дыры при минимальной кривизне.

Результаты работы определяют новые возможности для развития систем энергетической и военной безопасности ядерных и иных стратегических объектов, способствуют расширению космических исследований и могут рассматриваться как теоретическая предпосылка для становления и развития квантовой теории тяготения.

Список литературы

1. Качур С.А. Модуляция сингулярности ядерного реактора вблизи мгновенной критичности / С.А. Качур // Энергетические установки и технологии. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 18 - 26.
2. Качур С.А. Искривление пространства ядерного реактора вблизи мгновенной критичности посредством естественных пространственно-временных монополей / С.А. Качур // Энергетические установки и технологии. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т. 2. – № 1. – С. 12 - 19.
3. 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.
4. 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.
5. Качур С.А. Движение космического аппарата на

основе модуляции кривизны пространства / С.А. Качур // Радиотехника и информатика, 2013. – Вып. 2(21). – С. 22 - 26.

6. Качур С.А. Модуляция кривизны пространства на основе системы ядерных реакторов / С.А. Качур // 36. наук. пр. СТУЯЭтаП. – Севастополь: СТУЯЭиП, 2014. – Вып. 2(50). – С. 13 - 26.
7. Качур С.А. На грани ядерного взрыва: электромагнитное управление ядерными реакторами и искривление пространства / С.А. Качур. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2014. – 100 с.
8. Хокинг С. Природа пространства и времени / С. Хокинг, Р. Пенроуз. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 160 с.
9. Блохинцев Д.Н. Пространство и время в микромире / Д.Н. Блохинцев. – М.: Наука, 1982. – 176 с.
10. Новиков И.Д. Физика черных дыр / И.Д. Новиков, В.П. Фролов. – М.: Наука, 1986. – 328 с.

References

1. Kachur S.A. Singularities modulation of nuclear reactor near-by instantaneous criticality. *Anergeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2015, Vol. 1, No 1, pp. 18-26.
2. Kachur S.A. Space Curvature of Nuclear Reactor Near-by Prompt Criticality by means of natural spatio-temporal monopole. *Anergeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2016, Vol. 2, No 1, pp. 12-19.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Kachur S.A. Modulation of space curvature on the basis of the nuclear reactors system. *Sb. nauch. tr. SNUYaE i P*, 2014, No. 2(50), pp. 13-26.
7. Kachur S.A. *Na grani yadernogo vzryva: elektromagnitnoe upravlenie yadernymi reaktorami i iskrivlenie prostanstva*. [On verge of nuclear explosion: electromagnetic management by nuclear reactors and curvature of space]. Sevastopol, NPTh «EKOSI-Gidrofizika» Publ, 2014, 100 p.
8. Hawking S., Penrose R. *Priroda prostranstva I vremeni*. [The Nature of Space and Time]. Izhevsk, NICH «Regulyarnaya I khaoticheskaya dinamika», 2000, 160 p.
9. Blokhinshev D.N. *Prostranstvo i vremeya v mikromire* [Space and time in microcosm]. Moscow, Nauka Publ., 1982, 176 p.
10. Novikov I.D., Frolov V.P. *Fizika chyornix dir* [Physics of black holes]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 328 p.

УДК 621.039.56

Статистический метод диагностики пространственного распределения энергии в активной зоне ядерного реактора

С.А. Качур¹, Е.М. Кошевская²

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹kachur_62@mail.ru

Статья поступила 11.05.2016 г.; после доработки 13.05.2016 г.

Аннотация

Разработан метод диагностики деформации энерговыделения в активной зоне больших ядерных реакторов. Описан эффект перераспределения энергии между полями тепловой и нейтронной мощности в больших активных зонах. Даны параметры, характеризующие наличие деформации. Определены значения параметров деформации, приводящей к кризису теплообмена.

Ключевые слова: ядерный реактор, пространственное распределение, энерговыделение, тепловыделение, активная зона, статистические методы, диагностика.

Diagnostics Statistical Method of Energy Spatial Distribution in Active Zone of Nuclear Reactor

S.A. Kachur¹, E.M. Koshevskya²

Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, ¹kachur_62@mail.ru

Received 11.05.2016 y.; received in final form 13.05.2016 y.

Abstract

Diagnostics method of energy-release deformation in the active zone of large nuclear reactors is developed. The effect of energy redistribution between the fields of thermal and neutron energy in large active zone is described. Parameters characterizing the presence of deformation are given. The parameters values of deformation in the crisis of heat exchange are determined.

Keywords: nuclear reactor, spatial distribution, energy-release, heat-evolution, statistical method, diagnostics.

Введение

Опыт эксплуатации ЯЭУ показывает, что проблема безопасности – проблема потенциально возможных, маловероятных аварий по причине отказа технических систем и ошибок персонала. При анализе аварийных ситуаций основное внимание уделяется неуправляемому увеличению мощности активной зоны, уменьшению расхода теплоносителя и повышению давления в реакторе [1, 2].

Дальнейший прогресс в разработке ядерных реакторов для АЭС характеризуется увеличением единичной мощности, что достигается, с одной

стороны, увеличением размеров активной зоны, с другой – повышением удельной мощности (на единицу объема активной зоны) [1]. Большие размеры активной зоны усложняют контроль и регулирование распределения плотности потока нейтронов и, следовательно, контроль и регулирование распределения мощности по объему активной зоны. На условия работы тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), количество которых в больших реакторах составляет несколько десятков тысяч, влияют:

- уровень мощности реактора;
- скорость потока теплоносителя;

- положение стержней регулирования;
- распределение концентрации ядер продуктов деления, вызывающих отравление реактора, особенно при переходных процессах;
- изотопный состав топлива, который может меняться по активной зоне в силу неоднородных местных условий выгорания;
- состав загрузки по обогащению.

Работа при высокой удельной мощности создает тенденцию приближения значений технологических параметров, обеспечивающих нормальные условия эксплуатации твэлов, и других элементов активной зоны к предельным значениям, принятым для защиты от повреждения в первую очередь твэлов в различных условиях (уменьшение запасов). Таким образом, возникает необходимость точных измерений и регулирования распределения мощности по объему активной зоны в целях обеспечения при эксплуатации минимально допустимых запасов в любой точке активной зоны.

Широкое применение в приложении к динамике ядерных реакторов с распределенными параметрами нашел метод гармоник [1]. Наибольший интерес с точки зрения прогнозирования аварийных ситуаций представляет область быстрых процессов, которая определяется постоянной времени прогрева топлива и образования пара и равна десяткам секунд. Известно, что распределение тепловыделения по высоте активной зоны следует закону косинуса, а в радиальном направлении изменяется по функции Бесселя [3]. Оперативность метода гармоник достаточна для идентификации деформаций энерговыделения по объему активной зоны при медленных процессах (ксеноновом отравлении реактора), но не приемлема в случае быстрых процессов (переходных процессов). Поэтому для прогнозирования аварийной ситуации, связанной с ростом реактивности, необходимо разработать оперативный метод диагностики изменения формы поля тепловыделения.

В работе [4] предложена классификация форм поля тепловыделения, отражающая динамику деформации поля при возрастании реактивности, а также разработан метод идентификации формы поля тепловыделения на основе измерения показателей процесса теплообмена в камере смешения реактора. Повышение быстродействия возможно также за счет линеаризации нелинейных функций, описывающих физические процессы, протекающие в реакторе [5].

На ранних стадиях изменения формы поля тепловыделения, когда еще предельные и средние значения мощности реактора соответствуют

допустимым, предлагается использовать методы прикладной статистики.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – создание оперативного метода диагностики деформации форм энерговыделения и тепловыделения в активных зонах больших ядерных реакторов.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- 1) произвести анализ наиболее широко используемых методов при идентификации пространственного распределения мощности ядерного реактора;
- 2) разработать простой и быстродействующий метод определения деформации поля энерговыделения и прогнозирования возможности кризиса теплообмена в активной зоне ядерного реактора.

Взаимосвязь метода гармоник и статистических методов при исследовании поля энерговыделения ядерного реактора

Процессы, происходящие в ядерном реакторе, являются пространственно распределенными и не поддаются точному расчету. Несмотря на использование ЭВМ [1], невозможно избежать упрощений при математическом описании процессов в реакторе. Проблему аналитического исследования устойчивости решения нелинейных систем общего вида нельзя считать полностью решенной. В больших реакторах в результате переходных процессов наряду с изменениями полной мощности могут возникать деформации распределения мощности по объему активной зоны.

Рассмотрим применение в приложении к динамике ядерных реакторов с распределенными параметрами метода гармоник. В этом случае предполагается, что изменение мощности реактора медленное (сравнимое со временем образования ксенона), и поведение распределения плотности нейтронного потока можно описать стационарным одногрупповым уравнением диффузии. Существенное упрощение в расчетах достигается при использовании разложения возмущений в геометрические собственные функции.

При использовании метода гармоник поведение распределения плотности нейтронного потока описывают стационарным одногрупповым уравнением диффузии [1]

$$M^2 \Delta \varphi(r, t) + [k_{\infty}(r, t) - 1] \varphi(r, t) = 0$$

или

$$\Delta\varphi + B^2\varphi = 0,$$

где $B^2 \equiv (k_\infty - 1)/M^2$ – материальный параметр системы, зависящий от времени и координат.

Для гомогенизированного цилиндрического реактора высотой H и радиусом R геометрические собственные функции, полученные из решения одногруппового диффузионного уравнения, имеют вид

$$f_{ijk} = \cos(i\theta + \varphi) J_0(\alpha_j \frac{r}{R}) \cos\left[(1+2k) \frac{\pi z}{H}\right],$$

где α_j – нули функции Бесселя нулевого порядка первого рода; $i, j, k = 0, 1, 2, \dots$; φ – произвольный азимут.

Функции Бесселя первого рода $J_v(z)$ и второго рода $Y_v(z)$ являются решением уравнения Бесселя – линейного дифференциального уравнения вида

$$z^2 \frac{d^2 y}{dz^2} + z \frac{dy}{dz} + (z^2 - v^2)y = 0,$$

где v – неотрицательная величина.

Функции Бесселя первого рода $J_v(z)$ и второго рода $Y_v(z)$ определяются следующим образом:

$$J_v(z) = \left(\frac{z}{2}\right)^v \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-z^2/4)^k}{k! \Gamma(v+k+1)},$$

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{a-1} dt,$$

$$Y_v(z) = \frac{J_v(z) \cos(v\pi) - J_{-v}(z)}{\sin(v\pi)}.$$

Эти функции линейно независимы и задают полное множество решений для уравнения Бесселя.

Развитие радиально-азимутальных колебаний в цилиндрическом реакторе иллюстрируется рис. 1, где показано наложение высоких гармоник на форму основного распределения потока нейтронов в реакторе. Области возрастания потока нейтронов обозначены знаком «+», области уменьшения знаком «-». В правой части рис. 1 дано схематическое изображение развития деформаций распределения потока нейтронов. Возникающие колебания распределения мощности непрерывны. Чтобы погасить, например, гармонику f_{01} необходимо перемещать регулирующие стержни в противоположных направлениях в обеих половинах реактора.

Необходимо упростить процесс идентификации состояния реактора с точки зрения характеристики гармоник, определяющих форму энерговыделения в текущий момент времени и

прогноз развития ситуации.

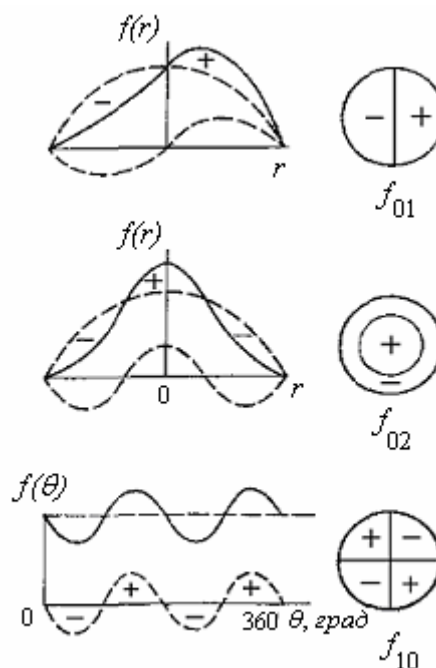


Рис. 1. Форма пространственных ксеноновых колебаний в цилиндрическом реакторе

Предлагается идентифицировать деформацию поля энерговыделения расчленив форму пространственных колебаний, описанную гармоникой функции Бесселя, на области с дальнейшей статистической обработкой информации по каждой области. Сравнение результатов статистических исследований позволит идентифицировать состояние активной зоны. В этом случае разработка критерия сравнения является основной проблемой при решении задачи диагностики деформации пространственных распределений мощности реактора.

Статистический метод идентификации деформации энерговыделения и тепловыделения в активной зоне реактора

Необходимость исследования устойчивости пространственного распределения мощности в больших реакторах впервые возникла в связи с экспериментальным обнаружением пространственных ксеноновых колебаний.

К пространственной неустойчивости распределения мощности может привести расположение стержней регулирования в активной зоне больших ВВЭР. Рассмотрим расположение органов регулирования в соответствии с рис. 2.

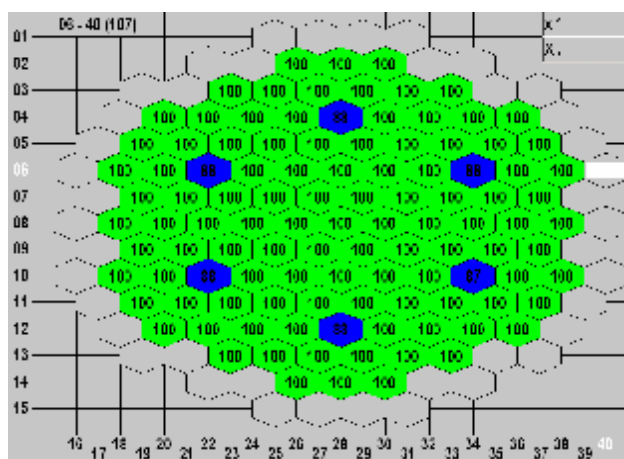


Рис. 2. Расположение стержней защиты и регулирования

В этом случае стержни управления и защиты разбивают активную зону на две области: центральную M1 с диаметром, равным третьей части диаметра активной зоны, и оставшуюся периферийную область M2. Такое разделение порождает колебания, которые можно описать второй гармоникой функции Бесселя. Причем, в одном полупериоде колебания мощности активной зоны возникает ситуация, представленная на рис. 1, когда область возрастания потока нейтронов является центральной (случай А), а периферийная область определяется уменьшением потока, а во втором полупериоде знаки областей («+» и «-» на рис. 1) меняются на противоположные (случай В). Назовем эту гармонику первичной. Внутри каждой из областей возникают вторичные колебания, описываемые первой, второй и третьей гармониками функции Бесселя, которые с изменением знака приращения потока нейтронов, определяемого первичной гармоникой, синхронно меняют свои знаки. Таким образом, изменение приращения амплитуд гармоник во времени описывается функцией косинуса. Колебания мощности активной зоны при выделении гармоник, описываемых функцией Бесселя, представлены на рис. 3.

Учет таких колебаний энерговыделения необходим при введении отрицательной реактивности. На рис. 4 представлена картограмма тепловыделения, которая соответствует возрастанию потока нейтронов в центральной области, при этом для твэла с координатами 03-33 энерговыделение превышает допустимое.

Введение недостаточной отрицательной реактивности (изменение положения регулирующих стержней (рис. 5)) увеличило деформацию поля энерговыделения, что способствовало дальнейшему развитию аварийной ситуации.

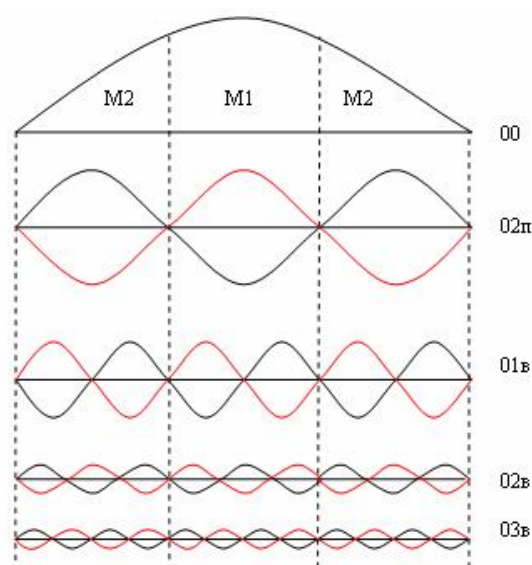


Рис. 3. Колебания мощности активной зоны

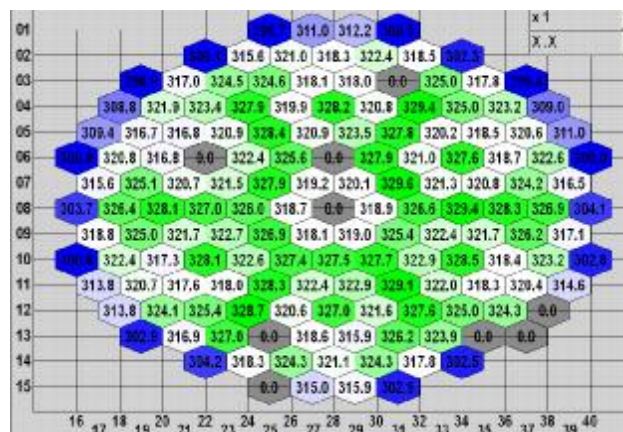


Рис. 4. Распределение объемного тепловыделения активной зоны при аварии (случай А)



Рис. 5. Энерговыделения активной зоны при изменении положения регулирующих стержней

В дальнейшем в результате введения достаточной отрицательной реактивности параметры активной зоны приняли значения, не превышающие допустимые пределы (рис. 6).

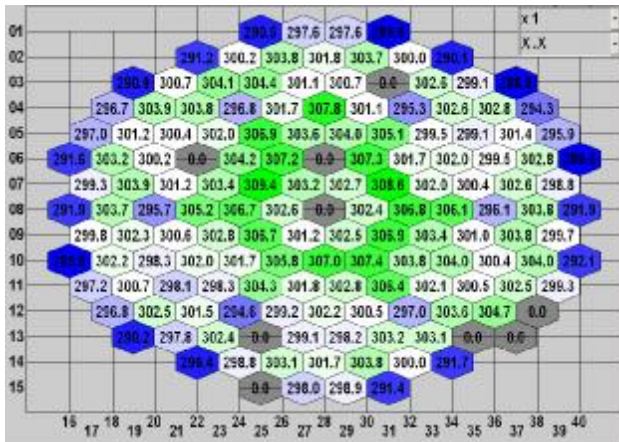


Рис. 6. Параметры активной зоны после изменения положения стержней регулирования и защиты (случай А)

Пример распределения тепловыделения и энерговыделения в активной зоне, описываемое первичной гармоникой при знаке «-» в центральной области М1 и «+» для периферийной области М2, представлен на рис. 7 и рис. 8 соответственно.

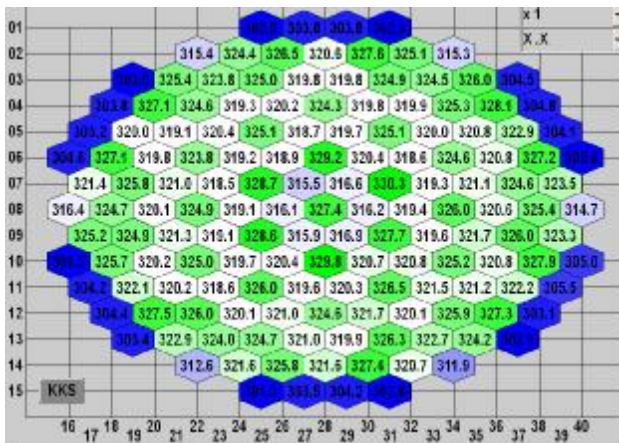


Рис. 7. Распределение объемного тепловыделения в активной зоне (случай В)

Анализ экспериментальных данных позволил определить эмпирический критерий устойчивости пространственного распределения тепловой и нейтронной мощности. Для определения области устойчивости пространственного распределения в качестве эталона рассматривалась функция косинуса, а именно соотношения, определяющие верхнюю и нижнюю границы области устойчивости

$$k_B = \frac{\cos(\pi/4)}{\cos(0)} = 0,707,$$

$$k_H = \frac{\cos(0) - \cos(\pi/4)}{\cos(\pi/4)} = 0,414.$$

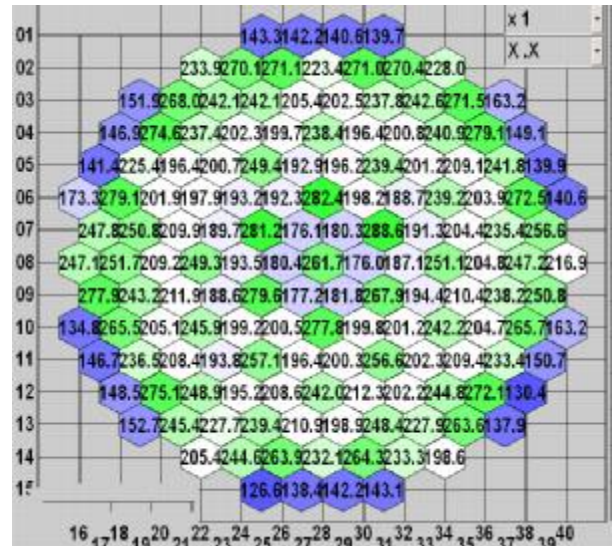


Рис. 8. Распределение объемного энерговыделения в активной зоне (случай В)

Параметрами, определяющими деформацию формы поля энерговыделения и тепловыделения, являются размах энерговыделения в твэлах для областей М1 и М2 и размах температур теплоносителя на выходе для областей М1 и М2 соответственно. Таким образом, два коэффициента описывают деформацию формы распределения мощности активной зоны

$$k_T = \frac{T_{\max}^{(M1)} - T_{\min}^{(M1)}}{T_{\max}^{(M2)} - T_{\min}^{(M2)}}, \quad k_N = \frac{N_{\max}^{(M1)} - N_{\min}^{(M1)}}{N_{\max}^{(M2)} - N_{\min}^{(M2)}},$$

где k_T – коэффициента формы тепловыделения; k_N – коэффициент формы энерговыделения; $T_{\max}^{(M1)}, T_{\min}^{(M1)}$ – максимальная и минимальная температура теплоносителя на выходе для области М1; $T_{\max}^{(M2)}, T_{\min}^{(M2)}$ – максимальная и минимальная температура теплоносителя на выходе для области М2; $N_{\max}^{(M1)}, N_{\min}^{(M1)}$ – максимальное и минимальное энерговыделение твэла для области М1; $N_{\max}^{(M2)}, N_{\min}^{(M2)}$ – максимальное и минимальное энерговыделение твэла для области М2.

Для того, чтобы процесс тепловыделения и энерговыделения был управляем, необходимо выполнение следующих условий

$$k_H \leq k_T \leq k_B, \quad k_H < k_N \leq k_B, \quad k_T \leq k_N. \quad (1)$$

При увеличении коэффициента формы энерговыделения k_N относительно k_B более 1 % или

при снижении величины коэффициента формы тепловыделения k_T относительно k_N более 1 % риск аварий возрастает.

В результате анализа приведенных выше картограмм получены следующие значения параметров формы распределения мощности:

рис. 4 – $k_T = 0,39$; рис. 6 – $k_T = 0,42$;

рис. 7 – $k_T = 0,55$; рис. 8 – $k_N = 0,7135$.

Представляется, что гармонические сжатие и растяжение поля энергоснабжения в процессе колебания изменяет свойства теплоносителя. В этом случае тепловая мощность Q может превышать нейтронную мощность N . Соотношение мощностей с учетом эмпирических коэффициентов формы и условий (1) имеет вид

$$\frac{Q^2}{N^2} k_T^2 + k_N^2 = 1. \quad (2)$$

Если форма поля энергоснабжения не имеет деформации и, следовательно, отсутствуют в активной зоне рассмотренные выше колебания, то $Q = N$ и $k_N = k_T = \cos(\pi/4)$.

Исходя из уравнения теплового баланса $Q = CG \cdot \Delta T$ и (2), получим следующую зависимость массового расхода теплоносителя от формы поля энергоснабжения

$$G = \frac{N}{C \Delta T} \sqrt{\frac{1 - k_N^2}{k_T^2}}, \quad (3)$$

где G – массовый расход теплоносителя; C – теплоемкость; ΔT – изменение температуры теплоносителя на выходе канала.

В соответствии с (3) в отличие от ситуации без деформации поля энергоснабжения массовый расход теплоносителя при постоянной нейтронной мощности должен увеличиваться в m раз

$$m = \sqrt{\frac{1 - k_N^2}{k_T^2}}.$$

При выявлении в работе реактора нарушения соотношений (1) более чем на 1 % необходимо уменьшить нейтронную мощность в m раз при неизменном массовом расходе теплоносителя. Это необходимо учитывать в работе ГЦН.

Заключение

Разработан быстродействующий метод диагностики деформации формы энерго- и тепловыделения в активной зоне больших ядерных реакторов типа ВВЭР. Описан эффект перераспределения энергии между полями тепловой и нейтронной мощности в больших активных зонах. Введены параметры, характеризующие на-

личие деформации. Определены значения параметров деформации формы, приводящих к кризису теплообмена.

Проведен анализ аварийных ситуаций при наличии деформации пространственного распределения мощности реактора.

Результаты исследования определяют новые возможности для развития систем контроля и управления АЭС с ядерными реакторами типа ВВЭР.

Список литературы

1. Емельянов И.Я. Научно-технические основы управления ядерными реакторами / И.Я. Емельянов, А.И. Ефанов, Л.В. Константинов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
2. Бахметьев А.М. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ / А.М. Бахметьев, О.Б. Самойлов, А.М. Усынов. – М.: Энергоиздат, 1988. – 136 с.
3. Крамер Э.У. Ядерные реакторы с кипящей водой / Э.У. Крамер. – М.: Иностранная литература, 1960. – 509 с.
4. Качур С.А. Идентификации формы поля тепловыделения в камере смешения ядерного реактора / С.А. Качур // Промышленная теплотехника, 2011. – Т. 33. – № 4. – С. 70 - 76.
5. Качур С.А. Исследование управляемости ядерного реактора на основе анализа функции Бесселя / С.А. Качур // 36. науч. пр. СТУЯЭтаП. – Севастополь: СТУЯЭтаП, 2013. – Вып. 2(46). – С. 36 - 45.

References

1. Emelyanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantsnov L.V. *Nauchno-tehnicheskie osnovy upravleniya yadernimi reaktorami* [Scientific and technical control bases by nuclear reactors]. Moscow, Energoizdat, 1981, 360 p.
2. Bahmetev A.M., Samoylov O.B., Usinov A.M. *Metodi ochenki i obespecheniya bezopastnosti YaEU* [Methods of estimation and providing of the NPE safety]. Moscow, Energoizdat, 1988, 136 p.
3. Kramer E.Y. *Yadernye reactory s kipyashchey vodoy* [Nuclear reactors with boiling water]. Moscow, Inostr. lit-ri Publ., 1960, 509 p.
4. Kachur S.A. Control by nuclear reactor by means of external electromagnetic radiation. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2011, Vol. 33, No. 4, pp. 70 - 76.
5. Kachur S.A. Research of dirigibility of nuclear reactor on the basis of analysis of the Bessel function. *Sb. nauch. tr. SNUYaE ta P*, Sevastopol, SNUYaE ta P, 2013, No. 2(46), pp. 36-45.

УДК 631.372

Методика определения оптимальных значений параметров гидромеханического измерительного преобразователя

В.А. Коваль¹, С.Т. Мирошниченко², И.Ю. Софийский³*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹V.A.Koval@sevsu.ru, ²miroshnichenkost@gmail.com, ³tttsev@yandex.ru,*

Статья поступила 07.06.2016 г.; после доработки 09.06.2016 г.

Аннотация

Предложена методика определения оптимальных значений параметров гидромеханического измерительного преобразователя, как составляющей автоматических систем управления и регулирования. Предложенная методика базируется на разработке физической и математической моделей измерительного преобразователя и определения на их основе статических характеристик преобразователя и зависимостей выходных сигналов от входных воздействий.

Ключевые слова: скорость движения, нагрузка, золотник, сила инерции, ускорение, характеристика.

Technique of Definition of Optimum Values Parameters of the Hydromechanical the Measuring Converter

V.A. Koval¹, S.T. Miroshnichenko², I.J. Sofijsky³*Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.**¹V.A.Koval@sevsu.ru, ²miroshnichenkost@gmail.com, ³tttsev@yandex.ru*

Received 07.06.2016 y.; received in final form 09.06.2016 y.

Abstract

The technique of definition of optimum values of parameters of the hydromechanical measuring converter, as a component of automatic control systems and regulation is offered.

The offered technique is based on working out of physical and mathematical models of the measuring converter and definition on their basis of static characteristics of the converter and dependences of target signals on entrance influences.

Keywords: speed of movement, loading, zolotnik, force of inertia, acceleration, characterization.

Введение

В гидромеханических системах автоматического управления и регулирования высокие динамические качества без введения дополнительных корректирующих связей могут быть обеспечены при использовании гидромеханических датчиков измерения управляющих и регулирующих сигналов. При этом отпадает необходимость в преобразовании сигналов из одного вида в другой, например, из электрического в механический или гидравлический и наоборот. Использование указанных сигналов является наиболее приемлемым и с точки зрения получения

высокой статической точности работы автоматической системы, поскольку исключает корректирующие обратные связи и дополнительные звенья, являющиеся, как показали теоретические исследования [1], источником погрешностей и искажений регулирующего сигнала.

Гидравлические датчики чаще всего находят применение в гидромеханических системах автоматического управления и регулирования нагрузок дизелей, в автоматических системах управления и регулирования, управления и защиты турбоагрегатов и других гидромашин [2].

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – разработать методику определения оптимальных значений параметров гидромеханического измерительного преобразователя, входящего в состав автоматических систем регулирования или управления.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить сравнительный анализ применяемых измерительных преобразователей;
- разработать физическую модель измерительного преобразователя;
- составить кинематическую схему преобразователя центробежного типа с пластинчатыми пружинами;
- установить оптимальную статическую характеристику измерительного преобразователя;
- рассчитать зависимости характеристик основной и дополнительных пружин измерительного преобразователя от веса грузов центробежного регулятора.

Анализ применяемых измерительных преобразователей

Измерительный преобразователь – техническое средство с нормируемыми метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины в другую величину или измерительный сигнал, удобный для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи. Измерительный преобразователь или входит в состав какого-либо измерительного прибора (измерительной установки, измерительной системы и др.), или применяется вместе с каким-либо средством измерений.

Датчик – конструктивно обособленный первичный преобразователь, от которого поступают измерительные сигналы (он «дает» информацию). Примеры: датчик температуры, датчик силы, датчик перемещения. Датчик, используемый в области измерений ионизирующих излучений, называют детектором. В большинстве случаев сам датчик представляет собой конструктивную совокупность одного или нескольких измерительных преобразователей (первичных и промежуточных) и сопутствующих им конструктивных элементов, предназначенную для измерения (контроля) конкретной физической величины и выполненную в виде единой конструкции. В этом случае входящий в состав датчика измерительный преобразователь, на который

непосредственно воздействует измеряемая физическая величина, называют в некоторых случаях чувствительным элементом.

При помощи подходящих датчиков гидравлические системы способны решать практически любые задачи: от сверхбыстрого регулирования в авиасимуляторах до эксплуатации под землей или при строительстве туннелей в самых жестких условиях. Датчики, как правило, оптимизированы в собственной аккредитованной лаборатории при помощи ускоренного испытания жизненного цикла. Это позволяет получить чрезвычайно износостойкую продукцию. Компании, как правило, предлагает продукцию высочайшего качества для всех областей применения гидравлических систем.

Гидравлические датчики чаще всего находят применение для:

- измерения давления в агрегатах, цилиндрах и ресиверах при помощи датчиков давления;
- измерения уровня в агрегатах при помощи емкостных датчиков и измерителей перемещения Micropulse;
- контроля регулировки клапанов при помощи высокопрочных индуктивных датчиков;
- определения конечных положений и постоянное измерение перемещений в цилиндрах: с помощью высокопрочных индуктивных датчиков и измерителей перемещения Micropulse;
- сетей и соединителей для промышленной коммуникации, [2].

Автоматизация различных технологических процессов, эффективное управление различными агрегатами, машинами, механизмами требуют многочисленных измерений разнообразных физических величин.

Датчики (измерительные преобразователи), или по-другому, сенсоры являются элементами многих систем автоматики - с их помощью получают информацию о параметрах контролируемой системы или устройства.

Датчик – это также элемент измерительного, сигнального, регулирующего или управляющего устройства, преобразующий контролируемую величину (температуру, давление, частоту, силу света, электрическое напряжение, ток и т.д.) в сигнал, удобный для измерения, передачи, хранения, обработки, регистрации, а иногда и для воздействия им на управляемые процессы.

И, наконец, датчик – это устройство, преобразующее входное воздействие любой физической величины в сигнал, удобный для дальнейшего использования.

Рассмотренные датчики полностью не обеспечивают требуемый диапазон формирования входных сигналов регулирования и управления сложных систем. В частности, не показаны датчики непосредственно фиксирующие частоту вращения и крутящий момента двигателя. На это и нацелена данная статья.

Определение оптимальных значений параметров измерительного преобразователя системы

Измерительные преобразователи, как правило, измеряют частоту вращения и нагрузку на вращающемся валу и позволяют сформировать статическую программу поддержания оптимальных значений регулируемых параметров.

Для составления математической модели будем рассматривать измерительный преобразователь угловой скорости центробежного типа с пластинчатыми пружинами как шарнирный

(рис. 1) с двумя центральными пружинами (основной – 1, учитывающей также упругость пластинчатых пружин, и дополнительной – 2), вращающийся вокруг горизонтальной оси ОХ с данной постоянной угловой скоростью ω . Силы инерции грузов С и D обозначим через P_u . Силами инерции самих звеньев пренебрегаем, т.к. их массы малы по сравнению с массами грузов. Силами трения в кинематических парах также пренебрегаем. Кроме сил инерции к грузам приложена сила тяжести (вес) G_r последних. На выходную муфту N_0 измерительного преобразователя действуют приведенная сила пружины золотника гидроусилителя – Q_3 и противоположно ей направленная суммарная сила упругости измерительного преобразователя угловой скорости – $R_{пр}$, состоящая из сил основной – $R_{пр1}$, дополнительной – $R_{пр2}$ и пластинчатых – $R_{пл}$ пружин. Звенья AC, CN, BD, DN имеют длину L , а OA – OB – длину ℓ .

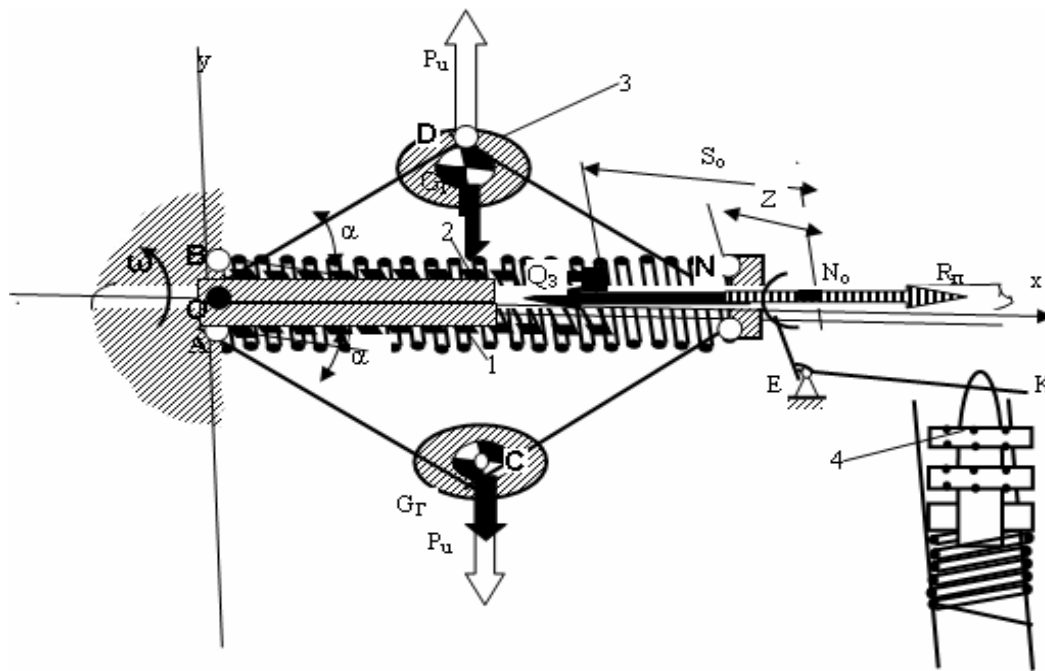


Рис. 1. Кинематическая схема измерительного преобразователя центробежного типа с пластинчатыми пружинами

Сообщив системе возможное перемещение, при котором угол имеет элементарное изменение $\delta\alpha$, получим следующее уравнение

$$G_r \cdot \delta y_d - G_r \cdot \delta y_c + R_{пр} \cdot \delta x_n - Q_3 \cdot \delta x_n + P_u \cdot \delta y_c = 0. \quad (1)$$

Как видно из рис. 1 (1):

$$\begin{cases} Y_D = L \cdot \sin \alpha + l; \\ Y_C = -L \cdot \sin \alpha - l; \\ X_n = 2l \cdot \cos \alpha, \end{cases} \quad (2)$$

откуда

$$\begin{cases} \delta y_D = L \cdot \cos \alpha \cdot \delta \alpha; \\ \delta y_C = -L \cdot \cos \alpha \cdot \delta \alpha; \\ \delta x_n = L \sin \alpha \cdot \delta \alpha, \end{cases} \quad (3)$$

тогда уравнение (1) примет вид:

$$2L(-R_{пр} \cdot \sin \alpha + Q_3 \cdot \sin \alpha + P_u \cdot \cos \alpha) \cdot \delta \alpha = 0. \quad (4)$$

Отсюда следует, что суммарная сила упругости измерительного преобразователя угловой скорости равна

$$R_{np} = P_u \frac{\cos \alpha}{\sqrt{1 - \cos^2 \alpha}} + Q_3. \quad (5)$$

На рис. 2 представлена заданная (оптимальная) статическая характеристика измерительного преобразователя угловой скорости.

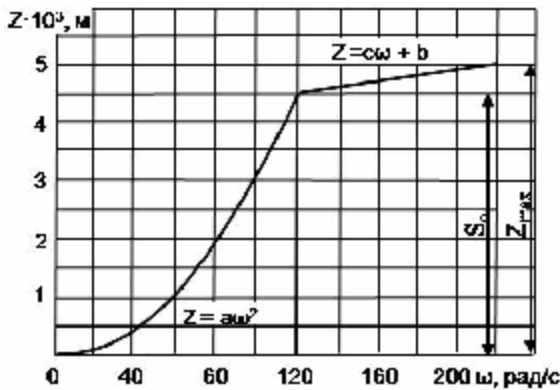


Рис. 2. Заданная (оптимальная) статическая характеристика измерительного преобразователя угловой скорости

Подставим в выражение (5) значения косинуса угла

$$\cos \alpha = \frac{X_n}{2L} = \frac{X_{NO} - Z}{2L},$$

где X_{NO} , X_n – соответственно исходное и текущее положение муфты N_n ; Z – смещение муфты N_n от исходного положения и центробежной силы.

Получим

$$P_u = \frac{G_r}{9} \cdot Y_{C(D)} \cdot \omega^2 = \frac{G_r}{9} \cdot l \cdot \omega^2 + \frac{G_r}{9} \cdot L \cdot \omega^2 \sqrt{1 - \left(\frac{X_{NO} - Z}{2L} \right)^2}, \quad (6)$$

где l – расстояние от центра массы грузов C и D до оси OX .

Линеаризуя линию оптимальной программы, например, по минимуму расхода топлива двигателем, (см. рис. 2) участками

$$Z = \alpha \omega^2 \text{ и } Z = c\omega + b,$$

откуда $\omega^2 = Z / \alpha$,

при

$$0 \leq Z \leq S_0 \quad (7)$$

и

$$\omega^2 = \left(\frac{Z - b}{c} \right)^2$$

при

$$S_0 \leq Z \leq Z_{\max}, \quad (8)$$

где α , b , c – постоянные коэффициенты (рис. 2); S_0 – зазор между муфтой N_n и дополнительной пружиной.

Получим окончательные выражения для суммарной силы упругости измерительного преобразователя угловой скорости соответственно на участках

$$0 \leq Z \leq S_0 \text{ и } S_0 \leq Z \leq Z_{\max} \quad (9)$$

$$R_{np} = \frac{G}{2q} \cdot l \cdot \frac{Z}{L} \cdot \frac{X_{NO} - Z}{\sqrt{1 - (X_{NO} - Z/2L)^2}} + \frac{G_r}{2q} \cdot \frac{Z}{\delta} (X_{NO} - Z) + Q_3,$$

$$R_{np} = \frac{G_r}{2q} \cdot l \cdot \left(\frac{Z - b}{c} \right)^2 \cdot \frac{X_{NO} - Z}{L \sqrt{1 - (X_{NO} - Z/2L)^2}} + \frac{G_r}{2q} \left(\frac{Z - b}{2} \right)^2 \cdot (X_{NO} - Z) + Q_3. \quad (10)$$

Поскольку характеристика пластинчатых пружин измерительного преобразователя угловой скорости и приведенная характеристика пружины золотника гидроусилителя задаются соответственно зависимостями

$$R_{пл} = K_{пл} \cdot Z \quad (11)$$

$$Q_3 = -K_Q \cdot Z + B_0,$$

где $K_{пл}$ – жесткость пластинчатых пружин; K_Q , B_0 – соответственно приведенные жесткость и предварительное поджатие пружины золотника.

Получим следующее выражение для характеристик основной пружины

$$R_{np1}(Z) = K_{np1} \cdot Z + b_{np1}; \quad K_{np1} = \frac{R_{np1}(S_0) - R_{np1}(0)}{S_0}; \quad (12)$$

$$b_{np1} = R_{np1}(0),$$

где K_{np1} , b_{np1} – жесткость и предварительное поджатие основной пружины.

Определим характеристики дополнительной пружины

$$R_{np1}(Z) - K_Q \cdot Z + b_0 - K_{пл} \cdot Z - K_{np1} \cdot Z - b_{np1} = K_{np2}(Z - S_0), \quad (13)$$

$$K_{np2} = \frac{R_{np2}(Z_{\max}) - R_{np2}(S_0)}{Z_{\max} - S_0}, \quad (14)$$

где K_{np2} – жесткость дополнительной пружины.

Пример расчета

В результате вычисления выражений (10 – 14) с использованием программы «MATLAB» [3] при исходных данных [4]:

$$q = 9,81 \text{ м/с}^2;$$

$$l = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\alpha = 3,125 \cdot 10^{-7} \text{ м.с}^2;$$

$$b = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\begin{aligned}c &= 5 \cdot 10^{-6} \text{ м.с;} \\L &= 3,08 \cdot 10^{-2} \text{ м;} \\X_{\text{NO}} &= 0,04 \text{ м;} \\S_0 &= 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м;} \\Z_{\text{max}} &= 5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}\end{aligned}$$

были получены оптимальные характеристики (жесткость, предварительное поджатие) основной и дополнительной пружин измерительного преобразователя угловой скорости в зависимо-

сти от веса грузов, характеристики пластинчатых пружин и приведенной характеристики пружины золотника гидроусилителя (рис. 3). Вес грузов G_r варьировался в пределах 0,2...0,7 н, жесткость пластинчатых пружин $K_{\text{пл}}$ в пределах 750...3000 Н/м, а жесткость K_Q и предварительное поджатие B_Q пружины золотника, соответственно в пределах 250...1000 Н/м и 2,5...10 Н.

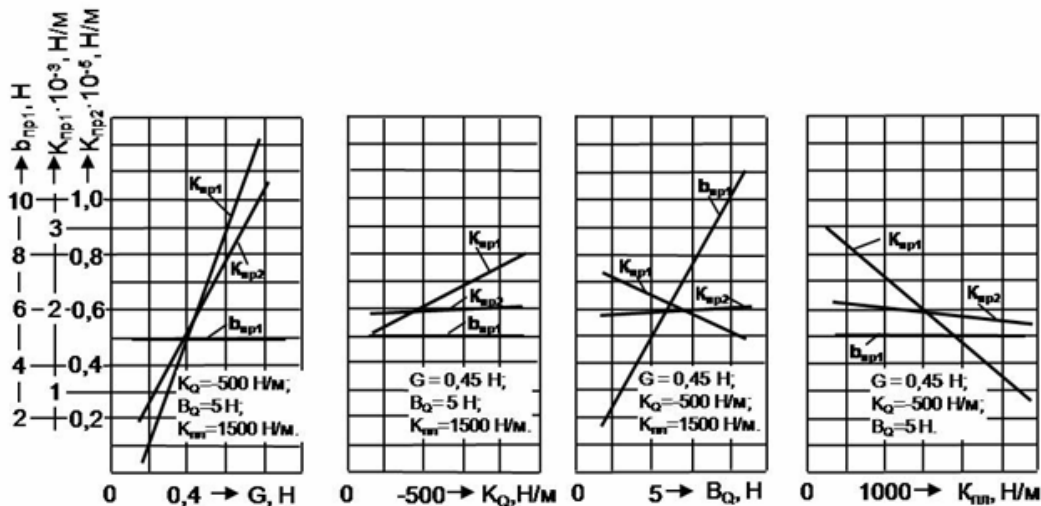


Рис. 3. Зависимость характеристик основной и дополнительной пружин измерительного преобразователя от веса грузовых характеристик пластинчатых пружин и пружины золотника

Заключение

Применяемые в системах измерительные преобразователи не обеспечивают весь диапазон формирования входных сигналов, прежде всего, частоты вращения и крутящего момента двигателя.

Разработка физической и математической моделей измерительного преобразователя и составление кинематической схемы преобразователя центробежного типа с пластинчатыми пружинами позволили установить оптимальную статическую характеристику измерительного преобразователя (см. рис. 2) и рассчитать зависимости характеристик основной и дополнительных пружин измерительного преобразователя от веса грузов центробежного регулятора (см. рис. 3).

Разработанная методика позволяет с достаточной точностью определять оптимальные значения параметров гидромеханического измерительного преобразователя, входящего в состав автоматической системы регулирования или управления.

Использование математических моделей позволит также вести настройку и отладку систем автоматического регулирования и управления в составе комплексного регулирования различных устройств.

Список литературы

1. Коваль В.А. Обоснование оптимальных энергетических режимов работы машинно-тракторных агрегатов: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Киев: ИМЭСХ УААН, 1983. – 24 с.
2. Баркан Я.Д. Автоматизация энергосистем / Я.Д. Баркан, А.А. Орехов. – М.: Высшая школа, 1981. – 271 с.
3. Пучков В.Н. Вычисления в среде «MATLAB» / В.Н. Пучков. – Севастополь: СИЯЭиП, 2001, 183 с.
4. Софийский И.Ю. Теория и практика научных исследований: учеб. пособие / И.Ю. Софийский. – Севастополь: СЧУЯЭиП, 2011. – 400 с.

References

1. Koval V.A. *Obosnovanie optimalnih energeticheskikh regimov raboti mashinno-traktornih agregatov* [Substantiation of optimum power operating modes of mashinno-tractor units], 1983, Kiev IMESX YAAN, 24 p.
2. Barkan Y.D., Orekhov A.A. *Avtomatisaziya energosistem* [Automation of power supply systems]. – Moscow, Vysshaya shkola, 1981, 271 p.
3. Puchkov V.N. *Vichisleniya v srede «MATLAB»* [Calculations in «MATLAB» environment], Sevastopol, SIYaEiP, 2001, 183 p.
4. Sofijsky I.J. *Teorij i prartika nauchnih isslidovaniy*. [The theory and practice of scientific researches], Sevastopol, SIYaEiP, 2011, 400 p.

УДК 539.3:536.46

Исследование напряженно-деформированного состояния рабочих колес турбодетандеров

В.А. Пухлий¹, С.Т. Мирошниченко², А.А. Журавлев³

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹pu1611@rambler.ru, ²miroshnichenkost@gmail.com

Статья поступила 15.06.2016 г.; после доработки 17.06.2016 г.

Аннотация

Излагается метод расчета на прочность рабочих лопаток турбодетандеров реактивного типа на основе теории пологих оболочек. Краевая задача, описываемая системой уравнений в частных производных, методом интегральных соотношений приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, интегрирование которой затем осуществляется модифицированным методом последовательных приближений. Приводится пример расчета.

Ключевые слова: криогенная техника, турбодетандеры, рабочие лопатки, расчет на прочность, краевая задача, модифицированный метод последовательных приближений

Study of Stress-Strain State of Impellers Expanders

V.A. Pukhly¹, S.T. MIroshnichenko², A.A. Zhuravlev³
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
¹pu1611@rambler.ru, ²miroshnichenkost@gmail.com

Received 15.06.2016 y.; received in final form 17.06.2016 y.

Abstract

The method of calculation of the strength of working blades of the expansion turbines of jet type based on the theory of shallow shells. The boundary value problem described by a system of partial differential equations by the method of integral relations is reduced to a system of ordinary differential equations with variable coefficients, integration of which is then modified by the method of successive approximations. A calculation example is given.

Keywords: cryogenic equipment, expansion turbines, rotor blades, structural analysis, boundary value problem, a modified method of successive approximations.

Введение

В настоящее время особое развитие получили холодильная и криогенная техника. В этих областях работали и работают выдающиеся ученые, о чем свидетельствуют семь Нобелевских премий в области низких температур, которые получили следующие ученые: Рамзай, Камерлинг-Оннес, Алварес, Бардин, Купер, Шепард, Ландау, Капица, Майер. Как видно, вклад отечественных ученых весьма значителен.

Впервые идея сжижения газов на основе

применения турбодетандеров была реализована в Англии в 1898 году. Запатентованный турбодетандер имел ротор из 14-ти лопаточных дисков и представлял собой радиальный 7-ми ступенчатый турбодетандер центробежного типа.

В конце 30-х годов XX столетия нобелевский лауреат, академик П.Л.Капица разработал эффективный радиальный турбодетандер реактивного типа [1], который был использован при создании крупных установок для получения кислорода. Турбодетандер работал по схеме одного низкого давления (0,6 Мн/м²). Запатентованный

турбодетандер имел рабочее колесо, состоящее из лопаток малой кривизны, изоэнтропийный (адиабатический) КПД турбодетандера составлял порядка 80 %. Следует подчеркнуть, что турбодетандер П.Л. Капицы стал основой конструкций современных турбодетандеров, как отечественных, так и зарубежных.

В настоящей работе рассматривается расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) рабочих колес (лопаток и конических дисков) турбодетандеров в поле действия центробежных сил инерции собственных масс.

Постановка цели научной работы

Целью научной работы является разработка методов расчетов на прочность рабочих колес турбодетандеров (лопаток и конических дисков).

Построена математическая модель, при которой НДС лопатки описывается системой уравне-

ний теории оболочек в частных производных Маргерра. В дальнейшем решение задачи основано на использовании метода интегральных соотношений Дородницына [4] и модифицированного метода последовательных приближений, разработанного проф. В.А. Пухлий [10-13].

При решении задач расчетов конических дисков турбодетандеров используются нелинейные уравнения конических оболочек, полученные проф. В.А. Пухлий. Решение краевой задачи для конических оболочек строится модифицированным методом последовательных приближений.

Формулировка задачи

На рис. 1. показан продольный разрез одноступенчатого воздушного радиального турбодетандера реактивного типа низкого давления со следующими техническими характеристиками: $p = 0,75 \text{ Мн/м}^2$; $p_k = 0,14 \text{ Нм/м}^2$.

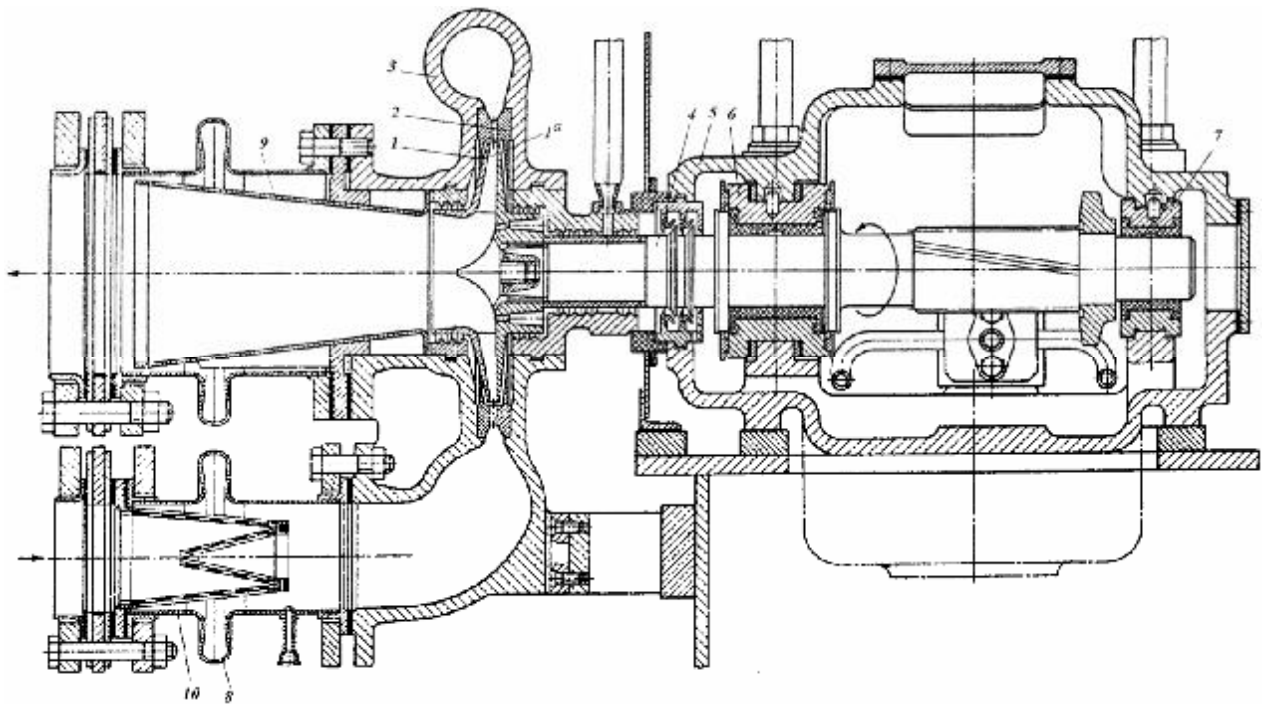


Рис. 1. Продольный разрез радиального воздушного турбодетандера реактивного типа: 1 – рабочее колесо; 1, а – лопатки; 2 – направляющий аппарат; 3 – корпус турбодетандера со спиральным подводом воздуха; 4 – вал с быстроходной шестерней редуктора; 5 – корпус редуктора; 6 – опорно-упорный подшипник; 7 – опорный подшипник; 8 – компенсаторы температурных деформаций; 9 – выходной диффузор; 10 – сетчатый фильтр

Исследуется напряженное состояние рабочих лопаток одноступенчатого радиального турбодетандера реактивного типа (рис. 1). Лопатка такого турбодетандера с точки зрения механики представляет собой трапецевидную пологую оболочку, защемленную по двум непараллельным краям, прилегающим к дискам и свободную

по двум другим краям в поле действия центробежных сил инерции собственных масс лопаток (рис. 2).

Напряженно-деформированное состояние лопатки описывается линейными уравнениями теории пологих оболочек Маргерра [2] смешанного типа относительно нормального перемеще-

ния $W(x, y)$ и функции напряжений $F(x, y)$:

$$\left. \begin{aligned} DV^4 W - \frac{h}{R} \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} &= q - p \frac{\partial w}{\partial x}; \\ \nabla^4 F + \frac{E}{R} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} &= -(1-\nu) \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь R и h – радиус срединной поверхности и толщина лопатки; E и D – модуль упругости и цилиндрическая жесткость лопатки;

q и $p_x = -\frac{\partial U}{\partial x}$ – нормальная и тангенциальная компоненты центробежной силы элемента лопатки, отнесенная к единице площади срединной поверхности:

$$\begin{aligned} q &= g \frac{w^2}{g} r h \sin b; \\ p_x &= g \frac{w^2}{g} r h \cos b; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} - \text{бигармонический оператор.}$$

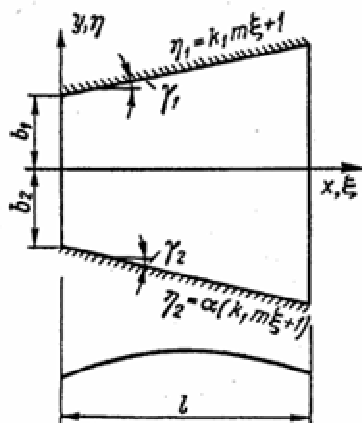


Рис. 2. Геометрия и система координат лопатки радиального турбодетандера

Для тангенциальной нагрузки p_x запишем потенциал:

$$U = \frac{1}{2} \frac{g}{g} w^2 h (R_2 \sin b_2 - x)^2, \quad (3)$$

где γ – объемный вес материала лопатки; g – гравитационное ускорение; p – расстояние от оси вращения ротора до центра тяжести элемента лопатки; $w = \rho n / 30$ – угловая скорость вращения ротора; h – толщина лопатки; β – угол между направлением центробежной силы и по-

верхностью лопатки; b_1 и b_2 – углы входа и выхода потока; R_2 – радиус колеса.

Лопатка по краям $y_1 = k_1 x + b_1 = r$ и $y_2 = k_2 x + b_2 = ar$ свободно закреплена (допускается смещение кромок в плоскости лопатки).

При этом $k_1 = \operatorname{tg} g_1$, $k_2 = \operatorname{tg} g_2$, $a = -\frac{k_2}{k_1} = -\frac{b_2}{b_1}$ –

геометрические параметры лопатки.

Граничные условия для прогиба $W(x, y)$ будут:

$$W = \frac{\partial W}{\partial n} = 0. \quad (4)$$

Граничные условия для функций напряжений при отсутствии объемных сил и нагрузки на контуре записываются аналогично [3]:

$$F = \frac{\partial F}{\partial n} = 0. \quad (5)$$

Для свободных краев $x = 0$, $x = l$ граничные условия имеют вид:

– для функций прогиба $W(x, y)$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + n \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} &= 0; \\ \frac{\partial^3 W}{\partial x^3} + (2-n) \frac{\partial^3 W}{\partial x \partial y^2} &= 0; \end{aligned} \quad (6)$$

– для функции напряжений $F(x, y)$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = 0. \quad (7)$$

Введем безразмерные координаты $\xi = \frac{x}{l}$,

$\eta = \frac{y}{b_1}$. Тогда уравнение (1) перепишется в сле-

дующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \nabla_m^4 \bar{W} - sm^2 \frac{l^2 E p}{D} \frac{\partial^2 \bar{F}}{\partial h^2} &= 1 - \frac{p_x l^3}{D} \frac{\partial \bar{W}}{\partial x}; \\ \nabla_m^4 \bar{F} + m^2 \frac{l^2}{p R} \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial h^2} &= -\frac{(1-n) l^2}{p^2} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Здесь $s = \frac{h}{R}$, $m = \frac{l}{b_1}$ – геометрические па-

раметры лопатки; $p = \frac{q l^4}{D}$ – параметр нагрузки;

$\bar{W} = \frac{W}{p}$, $\bar{F} = \frac{F}{p^2 E}$ – безразмерные величины функции прогибов и функции напряжений.

Линейный дифференциальный оператор ∇_m^4 будет:

$$\nabla_m^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2m^2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial h^2} + m^4 \frac{\partial^4}{\partial h^4}.$$

Граничные условия (6) примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial x^2} + nm^2 \frac{\partial^2 \bar{W}}{\partial h^2} &= 0; \\ \frac{\partial^3 \bar{W}}{\partial x^3} + (2-n)m^2 \frac{\partial^3 \bar{W}}{\partial x \partial h^2} &= 0, \end{aligned} \quad (9)$$

а граничные условия (7) запишутся следующим образом:

$$\frac{\partial^2 \bar{F}}{\partial h^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 \bar{F}}{\partial x \partial h} = 0. \quad (10)$$

Решение краевой задачи

К решению системы уравнений (8) применим метод интегральных соотношений Дородницына [4]. В соответствии с методом представим решение (8) в виде:

$$\begin{aligned} \bar{W}(x, h) &= \sum_{i=1}^n j_i(x, h) X_i(x); \\ \bar{F}(x, h) &= \sum_{j=1}^n y_j(x, h) X_j(x), \end{aligned} \quad (11)$$

где $j_i(x, h)$ и $y_j(x, h)$ – системы аппроксимирующих функций, удовлетворяющих граничным условиям (4) и (5); $X_i(x)$ и $X_j(x)$ – искомые функции.

Ограничиваясь двухчленным приближением, представим аппроксимирующие функции в виде степенных полиномов Якоби [5, 6]:

$$\begin{aligned} j_1 &= y_1 = h^4 - 2(1+a)rh^3 + \\ &+ (1+4a+a^2)r^2h^2 - 2a(1+a)r^3h + a^2r^4; \\ \varphi_2 &= \psi_2 = \eta^5 - \frac{5(1+\alpha)}{2}r\eta^4 + \\ &+ 2(1+3\alpha+\alpha^2)r^2\eta^3 - \\ &- \frac{1+9\alpha+9\alpha^2+\alpha^2}{2}r^3\eta^2 + \\ &+ \alpha(1+3\alpha+\alpha^2)r^4\eta - \frac{\alpha^2(1+\alpha)}{2}r^5. \end{aligned} \quad (12)$$

Применяя алгоритм метода интегральных соотношений к уравнениям (8), получим разрешающую систему четырех обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами относительно искомых функций $X_m(x)$ в общем случае неэйлеровского типа:

$$X_m^{IV} = \sum_{n=1}^{m^*} \sum_{i=0}^3 A_{n,i}^m X_n^i + f_m \quad (m=1, 2, 3, 4). \quad (13)$$

Здесь v – номер неизвестной функции, при которой стоит коэффициент $A_{n,i}^m$; m – номер уравнения; i – порядок производной от неизвестной функции.

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

Как известно, в математике не существует общего метода интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Существуют лишь отдельные работы, в которых проводятся точные решения обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Это, прежде всего, работа Е. Хонеггера [7], в которой приводится точное решение в функциях Бесселя для конических дисков линейно-переменной толщины, а также решения А.Д. Коваленко [8] и Я.М. Григоренко [9] для конических дисков переменной толщины, полученные в гипергеометрических функциях.

В работах профессора В.А. Пухлия [10-12] для интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений произвольного порядка с переменными коэффициентами был предложен модифицированный метод последовательных приближений.

В настоящей работе модифицированный метод последовательных приближений применяется к интегрированию систем дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами 4-го порядка.

В соответствии с методами переменные коэффициенты $A_{n,i}^m$ и свободный член f_m представим степенными полиномами, непрерывными на интервале изменения независимой переменной:

$$\begin{aligned} A_{n,i}^m &= \sum_{k=0}^q a_{n,i,k}^m x^k; \\ f_m &= \sum_{k=0}^q f_{k,m} \frac{x^k}{k!}. \end{aligned} \quad (14)$$

Общее решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (13), полученное модифицированным методом последовательных приближений, имеет вид [10,11]:

$$X_m = \sum_{\mu=1}^{4m} C_{\mu} \left[\frac{\xi^{\mu-4m+3}}{(\mu-4m+3)!} \delta + \sum_{n=1}^{\infty} X_{\mu,n}^m \right] + \sum_{j=0}^q b_{j,0}^m \frac{\xi^{j+4}}{(j+4)!} + \sum_{n=2}^{\infty} X_n^{m*} \quad (m=1, 2, 3, 4), \quad (15)$$

где $b_{j,0}^m = f_{k,m}$ ($j=k$); μ – номер фундаментальной функции; C_m – произвольные постоянные интегрирования.

Первое приближение $X_{m,1}^m$ ($m=1, 2, 3, 4$) получается из подстановки нулевого приближения $\frac{x^{m-4m+3}}{(m-4m+3)!} d$ в правую часть системы

$$X_m^{IV} = \sum_{n=1}^4 \sum_{i=0}^3 A_{n,i}^m X_n^i.$$

В решении (15) $\delta = 1$, если $4(m-1) < m \leq 4m$ и $\delta = 0$ для остальных μ :

$$X_{m,n}^m = \sum_{j=1}^b b_{j,n,m}^m \frac{x^{n+j+2}}{(n+j+2)!}; \quad (16)$$

$$X_n^{m*} = \sum_{j=1}^b b_{j,n}^m \frac{x^{n+j+2}}{(n+j+2)!}, \quad (17)$$

где $\beta = n(q+3) - 2$.

Коэффициенты $b_{j,n,m}^m$ и $b_{j,n}^m$ определяются через коэффициенты предыдущих приближений по рекуррентным формулам:

$$b_{j,n,m}^m = \sum_{n=1}^4 \sum_{i=0}^3 \sum_{k=0}^q a_{n,i,k}^m b_{n,m,(j+i-k-3)}^{n-1} \times \frac{1}{n+j-1} \prod_{g=0}^k (n+j-1-g); \quad (18)$$

$$b_{j,n}^m = \sum_{n=1}^4 \sum_{i=0}^3 \sum_{k=0}^q a_{n,i,k}^m b_{n,m,(j+i-k-3)}^{n-1} \frac{1}{n+j} \times \prod_{g=0}^k (n+j-g) \quad (19)$$

Постоянные C_m , входящие в общее решение системы (15), находятся из граничных условий на остальных двух краях лопатки (9), (10).

Пример расчета

В соответствии с изложенным аналитическим решением задачи разработана программа численной реализации полученного решения на ЭВМ. Суммарные напряжения s_x , s_h , t_{xh} , возникающие в лопатке, получаются сложением чисто изгибных и мембранных напряжений. Вычислялись безразмерные величины нормальных

напряжений в основных сечениях лопатки по формулам:

$$\begin{aligned} \bar{s}_x &= \frac{s_x l^2 (1-n^2)}{Eh^2}; \\ \bar{s}_h &= \frac{s_h l^2 (1-n^2)}{Eh^2}; \\ \bar{t}_{xh} &= \frac{t_{xh} l^2 (1-n^2)}{Gh^2}. \end{aligned} \quad (20)$$

Для иллюстрации предложенного метода рассмотрен расчет на прочность лопатки турбодетандера при следующих данных. Для рабочего колеса: $R_1 = 290$ мм; $R_2 = 400$ мм; $n = 1500$ об/мин; $m = 12$ – число лопаток. Для лопатки: $l = b_1 = 200$ мм; $h = 3$ мм; $R = 500$ мм; $g_1 = 0,314$ рад; $g_2 = 0$. Материал лопатки – Ст-20.

На рис. 3 приводится график распределения безразмерных напряжений $\bar{s}_h$ в основных сечениях лопатки: на выходной кромке – сечение I; в средней части лопатки – сечение II и на входной кромке – сечение III.

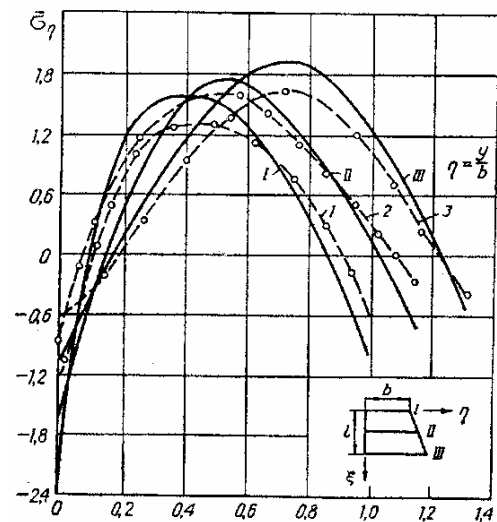


Рис. 3. Распределение напряжений $\bar{s}_h$ в основных сечениях лопатки

Как видно (см. рис. 3), максимальные величины напряжений наблюдаются в местах крепления лопаток к основному диску и в средней части лопатки. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными методом тензометрирования (на рис. 3 эпюры 1 – 3), показало хорошее совпадение.

Расчет на прочность конических дисков турбодетандеров

Как следует из рис. 1, основной и покрывающий диски рабочих колес турбодетандеров с точки зрения механики турбомашин представляют собой конические оболочки переменной жесткости. Рассмотрим конический диск переменной жесткости (рис. 4) в поле действия центробежных сил инерции собственной массы.

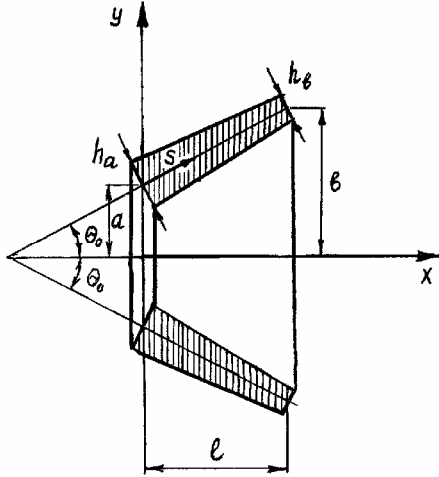


Рис. 4. Геометрия и система координат конического диска переменной жесткости

Ось X направлена вдоль оси вращения, а ось Y – нормально к оси X. Положение элемента деформированной образующей поверхности ds определим и далее:

$$\begin{aligned} \frac{dX_0}{ds} &= \cos q_0; & \frac{dY_0}{ds} &= \sin q_0; \\ \frac{1}{r_0} &= -\frac{dq_0}{ds}; & \frac{1}{r_0} &= \frac{\cos q_0}{Y_0}. \end{aligned} \quad (21)$$

Здесь r_0, ρ_0 – радиусы кривизны срединной поверхности вдоль образующей и в окружном направлении.

В результате деформации элемент ds перейдет в элемент $d\xi$, положение которого определяется координатами X, Y и углом θ . Радиусы кривизны деформированной поверхности обозначим через r и ρ . Тогда получим:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dx} &= \cos q; & \frac{dY}{dx} &= \sin q; \\ \frac{1}{r} &= -\frac{dq}{dx}; & \frac{1}{r} &= \frac{\cos q}{Y}. \end{aligned} \quad (22)$$

Пусть e_s, e_a – относительные деформации срединной поверхности вдоль образующей и в окружном направлении. Тогда имеем:

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \frac{d\xi - ds}{ds} = \frac{d\xi}{ds} - 1; & \frac{d\xi}{ds} &= 1 + \epsilon_s; \\ \epsilon_a &= \frac{2\pi Y - 2\pi Y_0}{2\pi Y_0} = \frac{Y}{Y_0} - 1; & \frac{Y}{Y_0} &= 1 + \epsilon_a. \end{aligned} \quad (23)$$

В рамках гипотез Кирхгофа-Лява удлинения волокон, расположенных на расстоянии z от срединной поверхности, будут:

$$e_s^{(z)} = e_s + z c_s; \quad e_a^{(z)} = e_a + z c_a. \quad (24)$$

Здесь c_s и c_a – изменения кривизны срединной поверхности конического диска:

$$\begin{aligned} c_s &= \frac{dq_0}{ds} - \frac{dq}{ds} = \frac{1}{r_0} \frac{1 + e_s}{r}; \\ c_a &= \frac{1 + e_a}{r} - \frac{1}{r_0} = \frac{\cos q}{Y_0} - \frac{\cos q_0}{Y_0} = \\ &= (1 + e_a) \frac{\cos q}{Y} - \frac{\cos q_0}{Y_0}. \end{aligned} \quad (25)$$

Запишем уравнение равновесия элемента диска:

$$\begin{aligned} \frac{d(N_s \cdot Y)}{dx} &= \sin q \cdot N_a + \frac{Y}{r} Q_s - Y \cdot q_t; \\ \frac{d(Q_s \cdot Y)}{dx} &= -\frac{Y}{r} N_s - \cos q \cdot N_a - Y \cdot q_n; \\ \frac{d(M_s \cdot Y)}{dx} &= Q_s \cdot Y + \sin q \cdot M_a. \end{aligned} \quad (26)$$

Используя известные соотношения закона Гука, а также выражения для усилий и моментов, записываем физические соотношения в следующем виде:

$$\begin{aligned} N_s &= B[\epsilon_s + \nu \epsilon_a]; & N_a &= B[\epsilon_a + \nu \epsilon_s]; \\ M_s &= -D[\chi_s + \nu \chi_a]; & M_a &= -D[\chi_a + \nu \chi_s], \end{aligned} \quad (27)$$

где $B = \frac{Eh}{1 - \nu^2}$; $D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}$ – жесткости диска на растяжение и изгиб.

Таким образом, уравнения равновесия (26), геометрические соотношения (22), (23), (25) и физические соотношения (27) образуют полную систему нелинейных дифференциальных уравнений и конечных соотношений. Перейдем в них к дифференцированию по s с помощью соотношений (23) и представим исходную систему уравнений в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{ds} &= (1 + e_s) \cos q; \\ \frac{dN_s}{ds} &= (1 + e_s) \left[-\frac{\sin q}{Y} (N_s - N_a) + \frac{1}{r} Q_s - q_t \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{dY}{ds} &= (1+e_s)\sin q; \\ \frac{dQ_s}{ds} &= (1+e_s) \times \\ &\times \left[-\frac{1}{r} N_s - \frac{1}{Y} (Q_s \cdot \sin q + N_a \cdot \cos q) + q_n \right]; \\ \frac{dq}{ds} &= -c_s + \frac{dq_0}{ds}; \\ \frac{dM_s}{ds} &= Q_s - \frac{\sin q}{Y} (M_s - M_a) \end{aligned} \quad (28)$$

Конечные соотношения примут вид:

$$\begin{aligned}e_s &= \frac{N_s}{B} - n \left(\frac{Y}{Y_0 - 1} \right); \\ N_a &= nN_s + (1-n^2)B \left(\frac{Y}{Y_0} - 1 \right); \\ c_s &= -\frac{M_s}{D} - n \frac{\cos q - \cos q_0}{Y_0}; \\ M_a &= nM_s - (1-n^2)D \frac{\cos q - \cos q_0}{Y_0}.\end{aligned}$$

Линеаризация уравнений

Введем приращения величин, которые в недеформированном состоянии не равны нулю. Для этого положим:

$$X = X_0 + x; \quad Y = Y_0 + y; \quad q = q_0 + J. \quad (29)$$

Подставляя (29) в (28) и отбрасывая нелинейные члены, получаем:

$$\begin{aligned}\frac{dX_0}{ds} + \frac{dx}{ds} &= \cos(\theta_0 + \vartheta) + \varepsilon_s \cos(\theta_0 + \vartheta) = \\ &= \cos \theta_0 \cdot \cos \vartheta - \sin \theta_0 \cdot \sin \vartheta + \\ &+ \varepsilon_s (\cos \theta_0 \cdot \cos \vartheta - \sin \theta_0 \cdot \sin \vartheta) \approx \\ &\approx \cos \theta_0 - \vartheta \sin \theta_0 + \varepsilon_s \cdot \cos \theta_0 - \varepsilon_s \cdot \vartheta \cdot \sin \theta_0.\end{aligned} \quad (30)$$

Из выражений (30) с учетом (21) получим:

$$\frac{dx}{ds} = e_s \cdot \cos q_0 - J \cdot \sin q_0. \quad (31)$$

Аналогичным образом получим:

$$\begin{aligned}\frac{dY_0}{ds} + \frac{dy}{ds} &= \sin(\theta_0 + \vartheta) + \varepsilon_s \cdot \sin(\theta_0 + \vartheta) = \\ &= \sin \theta_0 \cdot \cos \vartheta + \cos \theta_0 \cdot \sin \vartheta + \\ &+ \varepsilon_s \cdot \sin \theta_0 \cdot \cos \vartheta + \varepsilon_s \cdot \cos \theta_0 \sin \vartheta \approx \\ &\approx \sin \theta_0 + \vartheta \cdot \cos \theta_0 + \varepsilon_s \cdot \sin \theta_0 + \varepsilon_s \cdot \cos \theta_0 \cdot \vartheta.\end{aligned} \quad (32)$$

Отсюда следует:

$$\frac{dy}{ds} = e_s \cdot \sin q_0 + J \cdot \cos q_0. \quad (33)$$

Третье уравнение принимает вид:

$$\frac{dJ}{ds} = -c_s. \quad (34)$$

Уравнения равновесия после линеаризации примут вид:

$$\begin{aligned}\frac{dN_s}{ds} &= -\frac{\sin q_0}{Y_0} (N_s - N_a) + \frac{1}{r_0} Q_s - q_t; \\ \frac{dQ_s}{ds} &= \frac{1}{r_0} N_s - \frac{1}{Y_0} (Q_s \cdot \sin q_0 + N_a \cdot \cos q_0) + q_n; \\ \frac{dM_s}{ds} &= Q_s - \frac{\sin q_0}{r_0} (M_s - M_a).\end{aligned} \quad (35)$$

Остальные соотношения приводятся к виду:

$$\begin{aligned}e_s &= \frac{N_s}{B} - n \frac{y}{Y_0}; \\ N_a &= nN_s + (1-n^2)B \frac{y}{Y_0}; \\ c_s &= -\frac{M_s}{D} - n \frac{\sin q_0}{Y_0} J; \\ M_a &= nM_s - (1-n^2)D \frac{\sin q_0}{Y_0} J.\end{aligned} \quad (36)$$

Таким образом, мы получили шесть дифференциальных уравнений (31), (33)-(35) и четыре конечных соотношения (36). Для конического диска переменной жесткости в этих уравнениях необходимо положить $r_0^{-1} = 0$.

Введем безразмерные переменные, где R – характерный линейный размер, δ – характерная толщина:

$$\begin{aligned}x &= \delta \bar{x}; \quad y = \delta \bar{y}; \quad s = R \bar{s}; \\ Y_0 &= R \bar{Y}_0; \quad h = \delta \bar{h}; \quad \varepsilon_s = \frac{\delta}{R} \bar{\varepsilon}_s; \\ \vartheta &= \frac{\delta}{R} \bar{\vartheta}; \quad \chi_s = \frac{\delta}{R^2} \bar{\chi}_s; \quad Q_s = \frac{E \delta^2}{(1-\nu^2) R} \bar{Q}_s; \\ N_s &= \frac{E \delta^2}{(1-\nu^2) R} \bar{N}_s; \quad N_a = \frac{E \delta^2}{(1-\nu^2) R} \bar{N}_a; \\ M_s &= \frac{E \delta^2}{(1-\nu^2)} \bar{M}_s; \\ M_a &= \frac{E \delta^2}{(1-\nu^2)} \bar{M}_a; \quad q_n = \frac{E \delta^2}{(1-\nu^2) R^2} \bar{q}_n; \\ q_t &= \frac{E d^2}{(1-n^2) R^2} \bar{q}_t.\end{aligned} \quad (37)$$

Тогда дифференциальные уравнения для конического диска переменной жесткости в безразмерном виде запишутся:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{x}}{d\bar{s}} &= \bar{e}_s \cdot \cos q_0 - \bar{J} \sin q_0; \\ \frac{d\bar{y}}{d\bar{s}} &= \bar{e}_s \cdot \sin q_0 + \bar{J} \cos q_0; \\ \frac{d\bar{J}}{d\bar{s}} &= -\bar{c}_s; \\ \frac{d\bar{N}_s}{d\bar{s}} &= -\frac{\sin q_0}{\bar{Y}_0} (\bar{N}_s - \bar{N}_a) - \bar{q}_t; \\ \frac{d\bar{M}_s}{d\bar{s}} &= \bar{Q}_s; \\ \frac{d\bar{Q}_s}{d\bar{s}} &= -\frac{1}{\bar{Y}_0} (\bar{Q}_s \cdot \sin q_0 + \bar{N}_a \cdot \cos q_0) + \bar{q}_n. \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Конечные соотношения (36) переписываются:

$$\left. \begin{aligned} \bar{e}_s &= \frac{d}{R} \frac{1}{h} \bar{N}_s - n \frac{d}{R} \frac{\bar{y}}{\bar{Y}_0}; \\ \bar{c}_s &= -12 \frac{R^2}{d^2} \frac{1}{h^3} \bar{M}_s - n \sin q_0 \frac{\bar{J}}{\bar{Y}_0}; \\ \bar{N}_a &= n \bar{N}_s + (1-n^2) h \frac{\bar{y}}{\bar{Y}_0}; \\ \bar{M}_a &= n \bar{M}_s - \frac{1-n^2}{12} \sin q_0 \frac{d^2}{R^2} h^3 \frac{\bar{J}}{\bar{Y}_0}. \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

Граничные условия для конических дисков записываются обычно. Так, рассматривая на крае $s = 0$ условия жесткого защемления, имеем:

$$\bar{x} = \bar{y} = \bar{J} = 0. \quad (40)$$

Рассматривая на крае $s = s_2$ условия свободного края, получаем:

$$\bar{N}_s = \bar{Q}_s = \bar{M}_s = 0. \quad (41)$$

Продольные и окружные напряжения определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} s_s &= \frac{Ed}{(1-n^2)R} \frac{\bar{N}_s}{h} m \frac{6Ed}{(1-n^2)R} \frac{\bar{M}_s}{h^2}; \\ s_a &= \frac{Ed}{(1-n^2)R} \frac{\bar{N}_a}{h} m \frac{6Ed}{(1-n^2)R} \frac{\bar{M}_a}{h^2}. \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Решение краевой задачи

К решению краевой задачи для системы уравнений (38) применяется модифицированный метод последовательных приближений в смещенных полиномах Чебышева [13], в котором для ускорения сходимости решения используется метод телескопического сдвига степенного ряда Ланцоша [5].

Исходную систему уравнений (38) представим в нормальной форме Коши:

$$\frac{dX_m}{dx} = \sum_{n=1}^s B_{n,m} X_n + f_m \quad (m=1, 2, \dots, 6). \quad (43)$$

В соответствии с методом переменные коэффициенты $B_{n,m}$ и свободные члены f_m пред-

ставлены через смещенные полиномы Чебышева:

$$B_{n,m} = \sum_{r=0}^q b_{n,m,r} \cdot d_r^{-1} \sum_{k=0}^r a_k T_k^*(x); \quad (44)$$

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

Здесь q – степень интерполяционного полинома; a_k – коэффициенты разложения x^r в ряд по многочленам Чебышева. В выражениях (44) $d_r = 1$ для $r = 0$ и $d_r = 2^{2r-1}$ для остальных r .

Общее решение системы уравнений (43) имеет вид:

$$\begin{aligned} X_m &= \sum_{\mu=1}^s C_\mu \left[d_0^{-1} a_0 T_0^*(\xi) \delta + \sum_{n=1}^{\infty} X_{m,\mu,n} \right] + \\ &+ \sum_{j=0}^q t_{m,j,0} [d_{j+1} (j+1)!]^{-1} \sum_{k=0}^{j+1} a_k T_k^*(\xi) + \\ &+ \sum_{n=2}^{\infty} X_{m,n} \end{aligned} \quad (45)$$

где $t_{m,j,0} = f_{m,\mu}$ при $j = r$; μ – номер фундаментальной функции; C_μ – постоянные интегрирования. В решении (45) будет $\delta = 1$ если $m = \mu$ и $\delta = 0$ для остальных μ .

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

$$\frac{dX_m}{dx} = \sum_{n=1}^s B_{n,m} X_n.$$

Последующие приближения осуществляются по формулам:

$$\begin{aligned} X_{m,m,n} &= \sum_{j=1}^b t_{m,m,n} [d_{n+j-1} (n+j-1)!]^{-1} \sum_{k=0}^{n+j-1} a_k T_k^*(x); \\ X_{m,n} &= \sum_{j=1}^b t_{m,n,j} [d_{n+j-1} (n+j-1)!]^{-1} \sum_{k=0}^{n+j-1} a_k T_k^*(x), \end{aligned} \quad (46)$$

где $\beta = n(q+3) - 2$.

Коэффициенты $t_{m,m,n,j}$ и $t_{m,n,j}$ определяются через коэффициенты предыдущего приближения по рекуррентным формулам:

$$\begin{aligned} t_{m,m,n,j} &= \sum_{n=1}^s \sum_{r=0}^q b_{n,m,r} \cdot t_{n,m,n-1,j-r} (n+j-1)^{-1} \times \\ &\times \prod_{g=0}^r (n+j-1-g); \\ t_{m,n,j} &= \sum_{n=1}^s \sum_{r=0}^q b_{n,m,r} \cdot t_{n,n-1,j-r} (n+j)^{-1} \times \\ &\times \prod_{g=0}^r (n+j-g). \end{aligned} \quad (47)$$

Постоянные C_m , входящие в общее решение системы уравнений (45), находятся из граничных условий (40), (41).

Нормальная и тангенциальная составляющие центробежной нагрузки определяются по формулам:

$$\bar{q}_n = \frac{(1-n^2)R^2}{Ed^2} q(s) \cdot \cos q_0 \quad (0 \leq s \leq s_1);$$

$$\bar{q}_t = \frac{(1-n^2)}{Ed^2} q(s) \cdot \sin q_0 \quad (0 \leq s \leq s_1). \quad (48)$$

Выражение для $q(s)$ имеет вид:

$$q(s) = rh(s)w^2 Y_0(s) = r d h(s) w^2 R \bar{Y}_0, \quad (49)$$

где $r = g/g$ – массовая плотность материала; $\omega = 2\pi n$, где n – обороты (s^{-1}).

Заключение

Рассматриваются расчеты на прочность основных элементов рабочих колес (лопаток и дисков) турбодетандеров.

Разработаны математические модели расчета НДС основных элементов рабочих колес турбодетандеров на основе теории цилиндрических и конических оболочек переменной жесткости для сведения двумерной краевой задачи, описываемой системой дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами используется метод интегральных соотношений Дородницына. В дальнейшем интегрирование полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений, осуществляется модифицированным методом последовательных приближений, разработанный проф. В.А. Пухлий [10-13].

Список литературы

1. Капица П.Л. Турбодетандер для получения низких температур и его применение для очищения воздуха / П.Л. Капица // Журнал теоретической физики, 1939. – Т. 9. – Вып. 2. – С. 99 - 123.
2. Marguerre K. Zur Theorie der gekrümmten Platte großer Formänderung. – Jahrbuch 1939 der deutschen Luftfahrtforschung. Bd.1, pp. 413 - 418.
3. Григолюк Э.И. Изгиб цилиндрической панели с трапециевидным контуром / Э.И. Григолюк, В.Е. Попович, В.А. Пухлий // В кн.: Теория оболочек и пластин. – М.: Наука, 1973. – С. 660 - 664.
4. Дородницын А.А. Об одном методе решения уравнений ламинарного пограничного слоя / А.А. Дородницын // Журн. приклад. матем. и техн. физики, 1960, – № 3. – С. 111 - 118.
5. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа / К. Ланцош. – М.: Физматгиз, 1961. – 524 с.

6. Luke Y.L. Mathematical functions and their approximation. – New York – London: Academic Press. Inc., 1975, 608 p.
7. Honegger E. Festigkeit Berechnung von Kegelschalen mit linear veränderlich Wangstärke. – Lüzern, Promotionsarbeit, 1919, 16 p.
8. Коваленко А.Д. Изгиб дисков прямолинейного профиля / А.Д. Коваленко // Вестник машиностроения, 1947. – № 3. – С. 1 - 10.
9. Коваленко А.Д. Теория тонких конических оболочек и ее приложение в машиностроении / А.Д. Коваленко, Я.М. Григоренко, Л.А. Ильин. – Киев: Изд-во АН УССР 1963. – 287 с.
10. Пухлий В.А. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений / В.А. Пухлий // Журн. вычислит. матем. и матем. физики, 1978. – Т. 18. – № 5. – С. 1275 - 1282.
11. Пухлий В.А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики / В.А. Пухлий // Дифференциальные уравнения, 1979. – Т. 15. – № 11. – С. 2039 - 2043.
12. Пухлий В.А. Решение начально-краевых задач математической физики модифицированным методом последовательных приближений / В.А. Пухлий // Обзорение прикладной и промышленной математики, 2015. – Т. 22. – Вып. 4. – С. 493 - 495.
13. Пухлий В.А. Решение задачи об изгибе косоугольной в плане цилиндрической трехслойной панели модифицированным методом последовательных приближений / В.А. Пухлий // Прикладная механика, 1989. – Т. 22. – № 10. – С. 62 - 67.

References

1. Kapitza P.L. A Turboexpander to obtain the low temperatures and its application for purification vestusa. *Zhurnal teoreticheskoy fiziki*, 1939, Vol 9, No. 2, pp. 99 - 123.
2. Marguerre K. Zur Theorie der gekrümmten Platte großer Formänderung. – Jahrbuch 1939 der deutschen Luftfahrtforschung. Bd.1, pp. 413 - 418.
3. Grigolyuk E.I., Popovich V.E., Puhly V.A. Bending of a cylindrical panel with a trapezoidal contour. *Teoriya obolochek i plastin*. Moscow, Nauka, 1973, pp. 660 - 664.
4. Dorodnicyn A.A. On one method of solving equations of the laminar boundary layer. *Zhurnal prikladnoy matematiki i tekhnichskoy eiziki*, 1960, No. 3, pp. 111-118.
5. Lanczos K. *Prakticheskie metody prikladnogo analiza* [Practical methods of applied analysis]. – М.: Fizmatgiz, 1961. – 524 p.
6. Luke Y.L. Mathematical functions and their approximation. – New York – London: Academic Press. Inc., 1975, 608 p.
7. Honegger E. Berechnung von Festigkeit mit Kegelschalen linear veränderlich Wangstärke. – Lüzern, Promotionsarbeit, 1919, 16 p.

8. Kovalenko A.D. Bending disks straight profile. *Vestnik mashinostroeniya*, 1947, No. 3, pp. 1-10.
9. Kovalenko A.D., Grigorenko Ya.M., Ilyin L.A. *Teoriya tonkikh obolochek I eye prilozhenie v mashinostroenii* [Theory of thin conical shells and its application in engineering]. – Kiev: Izd-vo AN USSR 1963. – 287 p.
10. Puhly V.A. Method of analytical solution of two-dimensional boundary value problems for systems of elliptic equations. *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki*, 1978, Vol. 18, No. 5, pp. 1275-1282.
11. Puhly V.A. About one approach to the solution of boundary value problems of mathematical physics. *Differential'nye uravneniya*, 1979, Vol. 15, No. 11, pp. 2039-2043.
12. Puhly V.A. Solution of initial-boundary value problems of mathematical physics, that a specialized method of successive approximations. *Obozrenie prikladnoy I promyshchlennoy matematiki*, 2015, Vol. 22, No. 4, pp. 493-495.
13. Puhly V.A. Bending solution of the problem of non-rectangular in terms of cylindrical sandwich panels are modified by the method of successive approximations. *Prikladnaya mekhanika*, 1989, Vol. 22, No. 10, pp. 62-67.

УДК 621.039.587

Особенности организации аварийного отвода теплоты от СПОТ ПГ реакторной установки АЭС с ВВЭР

И.И. Свириденко

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

Статья поступила 18.06.2016 г.; после доработки 20.06.2016 г.

Аннотация

Рассмотрены особенности организации пассивного теплоотвода от реакторной установки АЭС с ВВЭР в условиях полного длительного обесточивания энергоблока АЭС. Представлены основные характеристики двух вариантов системы пассивного отвода остаточного тепловыделения через парогенераторы (СПОТ ПГ), осуществляющие теплоотвод воздуху – проект Московского института «Атомэнергoproject», и воде – проект Санкт-Петербургского института «Атомэнергoproject». Проанализированы преимущества и недостатки использования воздуха и воды в качестве конечного поглотителя остаточного тепловыделения активной зоны реакторной установки АЭС с ВВЭР.

Ключевые слова: АЭС с ВВЭР, безопасность, пассивный теплоотвод, конечный поглотитель, СПОТ ПГ.

Use of ambient water and air as the final heat repository for PRHRS SG of WWER Power Units

I.I. Sviridenko

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

Received 18.06.2016 y.; received in final form 20.06.2016 y.

Abstract

Specific features of emergency heat removal from PRHRS SG of a WWER-design NPP. Passive heat removal under complete long term blackout conditions is considered. Basic characteristics of the two passive heat removal through SG system designs (PRHRS SG), namely – of Moscow Institute «Atomenergoproject», where the heat is transferred to ambient air, and Sankt-Petersburg Institute «Atomenergoproject», where the heat is transferred to water are presented. Pros and contras of the two designs are analyzed.

Keywords: NPP of WWER design, nuclear safety, passive heat removal, final heat repository, PRHRS SG.

Введение

Одной из отличительных особенностей новых российских проектов АЭС с ВВЭР, обеспечивающих преодоление запроектных аварий в аварийных условиях с полным обесточиванием, потерей питательной воды и течами 1-го контура, является наличие в составе пассивных систем безопасности системы пассивного отвода остаточного тепловыделения (СПОТ) через парогенераторы (ПГ) и теплообменники-конденсаторы (ТК), расположенные за пределами гермообъема

реакторной установки (РУ). Причем, отечественными проектировщиками разработаны сразу два варианта организации отвода теплоты от ТК СПОТ ПГ: 1) к атмосферному воздуху; 2) к кипящей воде, размещенной в баках аварийного отвода теплоты (БАОТ).

Единого подхода к оценке выбранных вариантов не существует. По мнению одних экспертов, отличия связаны с применением разных концепций безопасности и соответствующих технических решений в рамках ответственности генеральных проектировщиков, откуда вытека-

ют различия режимов работы в аварийных ситуациях, а также соответствующие схемы и компоновки.

По мнению других – оба варианта имеют приблизительно одинаковый уровень безопасности, а различия выбранных конфигураций пассивных систем связаны с исторически сложившимися направлениями разработок в проектных институтах [1].

Постановка цели научной работы

Целью данной научной работы является анализ эффективности аварийного отвода остаточного тепловыделения СПОТ ПГ при использовании воздуха или воды в качестве конечного поглотителя, а также сравнение преимуществ и недостатков обоих вариантов. Под термином «конечный поглотитель» в работе рассматривается среда, к которой осуществляется отвод теплоты от наружной поверхности ТК.

Необходимость обоснования выбора типа конечного поглотителя для СПОТ новых РУ с ВВЭР определяет актуальность настоящей работы.

Назначение и схема СПОТ ПГ

СПОТ ПГ (проектное обозначение – JNB) предназначена для длительного отвода остаточного тепловыделения активной зоны (а.з.) к конечному поглотителю через 2-ой контур при запроектных авариях и осуществляет отвод остаточного тепловыделения и расхолаживание РУ в режимах полного обесточивания АЭС, полной потери питательной воды, а также обеспечивает резерв активным системам безопасности в случае их отказа.

В частности, проектом СПОТ ПГ реакторной установки с ВВЭР-1000/В-412, реализованном на АЭС «Куданкулам», проектом АЭС-2006 с РУ ВВЭР-1200/В-392М, разработанным Московским институтом «Атомэнергoproject» и строящимся в настоящее время на площадке АЭС «Нововоронежская-2», а также в СПОТ ПГ проекта ВВЭР-ТОИ предусмотрен отвод теплоты от ТК атмосферному воздуху.

В проекте СПОТ ПГ АЭС-2006 с ВВЭР-1200/В-491, разработанном Санкт-Петербургским институтом «Атомэнергoproject» для новых АЭС: «Ленинградская-2», «Балтийская» и «Белорусская», а также в проекте РУ средней мощности с ВВЭР-640/В-407, реализован вариант отвода теплоты от ТК к кипящей воде, находящейся в баках аварийного отвода теплоты (БАОТ).

СПОТ ПГ состоит из 4-х независимых каналов по одному на каждую циркуляционную пет-

лю РУ, подключенных к паровому и водяному объемам соответствующих ПГ, с резервированием 4×33 %. Схема СПОТ ПГ изображена на рис. 1.

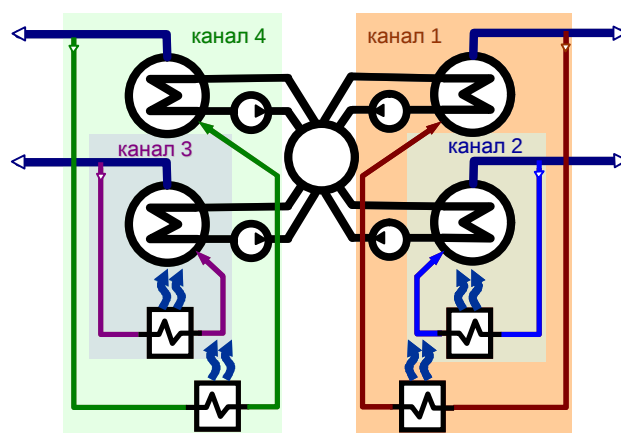


Рис. 1. Схема 4-х канальной СПОТ ПГ

Особенности использования воздуха для отвода теплоты от ТК СПОТ ПГ

При выборе в качестве конечного поглотителя атмосферного воздуха, имеющего неограниченный объем, исключается необходимость компенсации расходуемой массы охлаждающей среды в процессе аварийного теплоотвода. Это является основным преимуществом воздуха как конечного поглотителя. Соответственно, не требуются дополнительные технологические системы обеспечения хранения и пополнения запаса конечного поглотителя.

Другое, не менее важное преимущество использования воздуха – максимальный температурный напор между теплоносителем 1-го контура $T_{1к}$ и конечным поглотителем $T_{кп}$:

$$T_{1к} - T_{кп} = 300 - (-40...+40) = (260...340) ^\circ\text{C},$$

что обеспечивает необходимые условия для естественной циркуляции (ЕЦ) теплообменивающихся сред в контурах СПОТ. Расчетная температура воздуха на входе в теплообменник составляет $+38 ^\circ\text{C}$.

Еще одно важное преимущество использования воздуха – относительно простая организация режима его свободно направленного движения, что реализуется применением шахты (воздушного канала) высотой, достаточной для создания естественной тяги охлаждающего воздуха с расходом $37,8 \text{ м}^3/\text{с}$. Следовательно, не требуется в составе обеспечивающих систем наличия технических устройств активного типа (электровентиляторов) для принудительной подачи воздуха.

Но подобное техническое решение приводит к необходимости формирования воздушных каналов, имеющих достаточно протяженные тяговые участки с дефлектором на верхней отметке купола оболочки реакторного отделения, а также сравнительно громоздких дополнительных сооружений по периметру его верхней цилиндрической части для размещения ТК (рис. 2, 3).

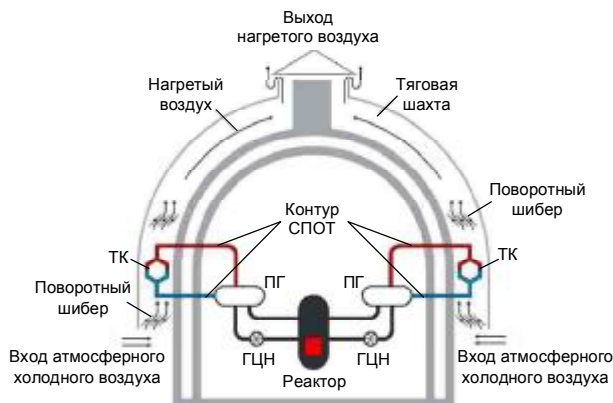


Рис. 2. Схема СПОТ ПГ с воздушным ТК

Для защиты системы от ветра воздушный тракт СПОТ имеет общий коллектор на входе холодного воздуха и общий дефлектор на выходе нагретого воздуха. В конструкции защитного контейнента предусмотрены элементы, обеспечивающие использование тепловой энергии воздуха СПОТ для организованного сбора и фильтрации протечек среды из внутренней защитной оболочки (ЗО) в зазор между оболочками [2].

Каждый из 4-х контуров СПОТ включает два ТК, трубопроводы пароконденсатного тракта с арматурой, тракт воздухопроводов с регуляторами, подводящих и отводящих воздух. На входе в ТК пара и выходе конденсата для отсечения неплотных ТК и ремонта установлены по два запорных клапана. Теплота отводится за счет ЕЦ всех сред: 1-го контура, пара и конденсата 2-го контура, а также естественной тяги охлаждающего атмосферного воздуха.

Основным недостатком воздуха как конечного поглотителя СПОТ является необходимость регулирования теплоотвода от ТК. Для недопущения чрезмерной скорости расхолаживания активной зоны (а.з.) при низкой температуре охлаждающего воздуха, а также для поддержания РУ в состоянии горячего резерва требуется регулирование степени открытия воздушных затворов на тракте охлаждающего воздуха. Для этого в СПОТ ПГ на тракте воздухопроводов, подводящих к ТК и отводящих воздух, используются специальные воздушные затворы с регуляторами [3].

При низкой температуре окружающего воздуха, низком давлении пара и открытых воздушных затворах в условиях ограничения поступления пара в ТК происходит его быстрое расхолаживание. Из-за снижения отводимой от реактора тепловой мощности давление в ТК резко падает, вплоть до образования вакуума. Даже небольшое количество неконденсирующегося газа может занять большой объем, что существенно ухудшает теплообмен и снижает парциальное давление пара. В условиях низкой температуры окружающего воздуха это грозит замерзанием конденсата в трубах ТК.



а)



б)

Рис. 3. Тяговые участки воздушных каналов (а) и дефлектор (б) СПОТ ПГ АЭС-2006

Несмотря на то, что используется регулятор пассивного типа, последний представляет собой сравнительно сложное механическое устройство с набором кинематических связей и специальных уплотнений (рис. 4). Изменение расхода воздуха обеспечивается поворотом лопаток шиберов, управляемых двумя приводами пассивного принципа действия в зависимости от давления пара 2-го контура. Приводы снабжены сильфонными уплотнениями, обеспечивающими герметичность пароводяного контура по отношению к окружающей среде. Кроме того, для возможности дистанционного перевода оператора регулирующего устройства в полностью открытое состояние в любой момент времени в состав ре-

гулирующего устройства введен специальный привод активного типа [3].



Рис. 4. Регулирующее устройство СПОТ ПГ с воздушным ТК [3]

Низкая интенсивность теплоотдачи воздуху приводит к необходимости развития внешней поверхности теплоотвода, что обеспечивается внешним оребрением трубной поверхности. Это существенно увеличивает массу и габариты ТК (рис. 5). Например, в СПОТ ПГ АЭС «Куданкулам» трубы ТК диаметром $(25 \times 2,5) \cdot 10^{-3}$ м имеют ребра диаметром $45 \cdot 10^{-3}$ м, толщиной $1 \cdot 10^{-3}$ м и шагом $5 \cdot 10^{-3}$ м. Длина оребренного участка змеевика составляет 3,41 м. Масса всех элементов СПОТ ПГ с воздушным ТК – 870 тонн.



а)



б)

в)

Рис. 5. Воздушный ТК СПОТ ПГ: трубный пучок с коллекторами (а), ТК в сборе с шиберами перед монтажом в воздушную шахту (б), оребренная труба (в)

Воздушный ТК СПОТ ПГ имеет весьма плотную компоновку теплообменной поверхности. В условиях запыленности атмосферного воздуха возникает проблема загрязнения теплообменной поверхности с течением времени, что приведет к необходимости ее последующей очистки.

К недостаткам следует отнести и необходимость коррозионной защиты наружной поверхности воздушного ТК с оребренными трубами из углеродистой стали. При эксплуатации АЭС в условиях повышенной температуры и влажности охлаждающего воздуха используется алюминиевое покрытие, нанесенное методом газоплазменной металлизации [4].

Кроме того, имеется проблема тепловой защиты привода шиберных заслонок от замерзания при низких температурах окружающего воздуха в зимний период.

На ранней стадии разработки этого проекта к ПГ каждой петли предполагалось подключать 4 воздушных ТК (всего 16), образующих 4 канала расхолаживания. Принятый позднее вариант ТК предусматривает подключение к одному ПГ не четырех, а трех ТК, причем их суммарная мощность увеличена по сравнению с прежними ТК. Так, в СПОТ ПГ АЭС «Куданкулам» и в проекте АЭС-1500 применяются три ТК на один ПГ, а в СПОТ ПГ АЭС «Нововоронежская-2» и в нереализованном проекте АЭС «Белене» – по два ТК мощностью по 8 МВт каждый на один ПГ.

Мощность теплоотвода воздушным СПОТ ПГ при авариях с течью 1-го контура составляет ~80 МВт.

В режиме ожидания ТК постоянно подключены по пару и конденсату к ПГ, воздушный тракт до и после ТК перекрыт воздушными затворами. В таком режиме имеются тепловые потери от нагретой теплоизоляции, от протечек воздуха через затворы и от утечки теплоты через строительные конструкции. Общие дополнительные потери теплоты СПОТ ПГ с воздушным ТК составляют 0,6 % от $N_{\text{СПОТ}}$.

При самых неблагоприятных внешних условиях (температура наружного воздуха $+50^\circ\text{C}$) мощность теплоотвода через три канала составляет не менее 2 % номинальной мощности реактора.

На начальной стадии аварии отвод остаточного тепловыделения более 2 % производится за счет частичного испарения воды из ПГ в атмосферу через БРУ-А. На рис. 6 приведены результаты расчетного моделирования аварийного процесса отвода остаточного тепловыделения при полном обесточивании с функционированием всех четырех каналов СПОТ [5].

На первом этапе за счет подключения СПОТ

только незначительная доля тепловыделений РУ отводится в окружающую среду. Основная часть теплоты отводится за счет сброса пароводяной смеси из ПГ в атмосферу, а СПОТ работает в режиме регулирования.

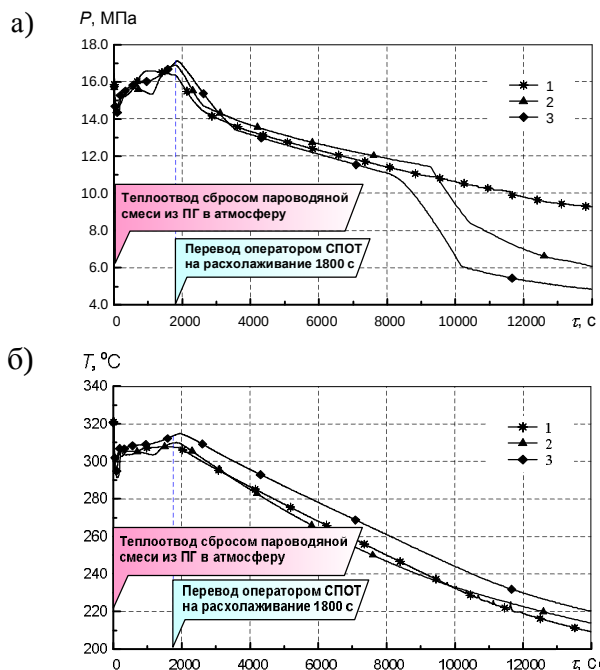


Рис. 6. Результаты расчетного моделирования изменения давления (а) и температуры (б) теплоносителя на выходе из реактора РУ В-392 при работе воздушного СПОТ ПГ: 1 – АТНЛЕТ 1.2.A; 2 – RELAP5/MOD3.2; 3 – ДИНАМИКА-97 [5]

После снижения уровня остаточного тепловыделения сбросные устройства 2-го контура закрываются, и потеря котловой воды из ПГ прекращается. На 1800 секунде система переводится в режим расхолаживания и отвод теплоты осуществляется уже только за счет работы СПОТ ПГ по замкнутой схеме: пар конденсируется в ТК, конденсат возвращается обратно в ПГ. Параметры РУ начинают снижаться, обеспечивается надежное охлаждение а.з. в течение всего последующего периода.

Таким образом, основной эксплуатационной особенностью воздушного СПОТ ПГ является его функционирование в двух режимах: регулирования (с управляемым сбросом пароводяной смеси из ПГ в атмосферу) и последующим переводом СПОТ в режим расхолаживания, что требует наличия системы управления. Управление аварийным процессом осуществляется пассивной системой. При этом возможно также участие оператора.

Особенности использования воды для отвода теплоты от ТК СПОТ ПГ

Главной особенностью организации теплоотвода от ТК к воде является необходимость размещения в верхней части здания реакторного отделения специальных емкостей – БАОТ, объемом, обеспечивающим отвод остаточного тепловыделения без пополнения запаса, как минимум, в течение 72 часов.

По сравнению с теплоотводом к воздуху СПОТ с БАОТ не нуждается в протяженных тяговых участках и громоздком дефлекторе, что существенно упрощает конструкцию купола оболочки реакторного отделения. Однако и водяной, и воздушный ТК должны располагаться в верхней части реакторного отделения для обеспечения необходимого движущего напора ЕЦ теплоносителя 2-го контура между ПГ и ТК. Поэтому для безопасного размещения БАОТ необходимо усиление купольной части ЗО реакторного отделения или формирование мощных консольных конструкций по его наружному периметру (рис. 7). Для заполнения БАОТ, контроля уровня, сообщения друг с другом и дренирования используется напорно-циркуляционная система.

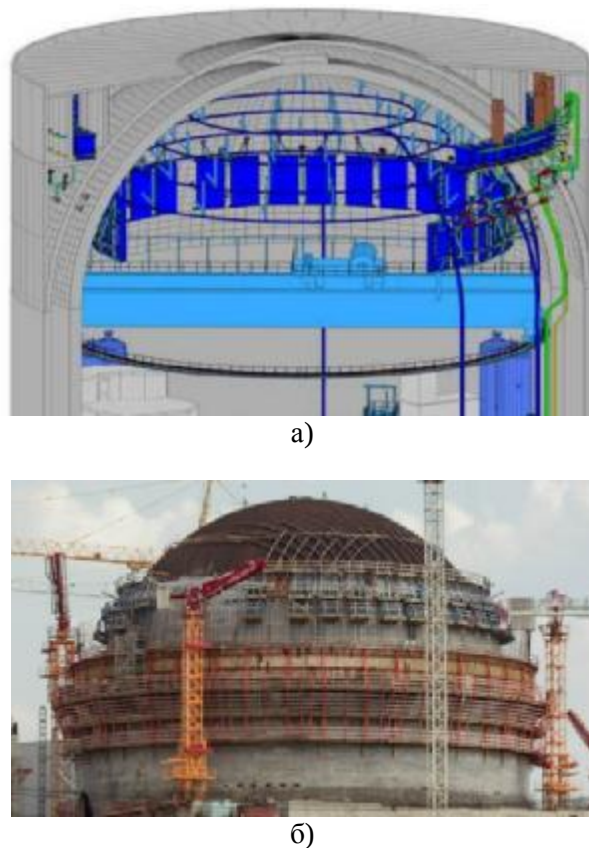


Рис. 7. Компонетка (а) и внешний вид (б) СПОТ ПГ АЭС-2006 с водяными ТК

Применение воды в качестве конечного поглотителя по сравнению с воздухом имеет ряд преимуществ. Высокая теплопоглощающая способность БАОТ за счет интенсивного теплоотвода при нагреве воды до линии насыщения и последующем испарении, а также большие значения коэффициента теплоотдачи при кипении воды на наружной поверхности ТК, соизмеримые с коэффициентом теплоотдачи при конденсации пара 2-го контура внутри труб ТК, обеспечивают высокую тепловую эффективность системы и компактность ТК.

Неизменность температуры выкипающей воды (100 °С) и практически не меняющаяся интенсивность теплоотвода при испарении воды формируют постоянные условия для теплоотвода в БАОТ, что дает возможность отказаться от регулирования отводимой СПОТ тепловой мощности на всем этапе аварийного процесса.

Поддержание слабоизменяющейся мощности расхолаживания установки с изменением в широких пределах давления пара 2-го контура достигается путем подбора соответствующего сечения быстродействующего клапана на конденсатопроводе.

К преимуществам использования воды для аварийного теплоотвода следует отнести и то, что наличие БАОТ позволяет формировать целую группу однотипных СПОТ повышенной надежности, эффективности и многофункциональности. Например, для теплоотвода от а.з. при обесточивании и потере питательной воды – СПОТ ПГ, а для теплоотвода от гермообъема при авариях с течью – СПОТ ЗО [6]. Обе системы замыкаются на общий БАОТ.

Каждый из 4-х каналов СПОТ включает один БАОТ с объемом воды 538 м³, 16 секций ТК, трубопроводы пара и конденсата, «большой» и «малый» пусковые клапаны, а также разобщительную арматуру (рис. 8).

БАОТ размещаются в отдельных помещениях кольцевой обстройки здания реакторного отделения над отметкой +59,85 и представляют собой железобетонные конструкции, облицованные нержавеющей сталью.

Секции ТК располагаются в нижней части БАОТ под уровнем воды 5,54 м. Теплообменные пучки соединены верхним подводящим и нижним отводящим коллекторами. Общая теплопередающая поверхность ТК каждого из четырех каналов СПОТ ПГ составляет ~226 м². Масса всех элементов СПОТ ПГ с БАОТ составляет 600 тонн.

На опускном трубопроводе каждого канала перед ПГ установлены «большой» и «малый» пусковые клапаны, обеспечивающие автомати-

ческий ввод системы в действие в соответствии с режимом теплоотвода.

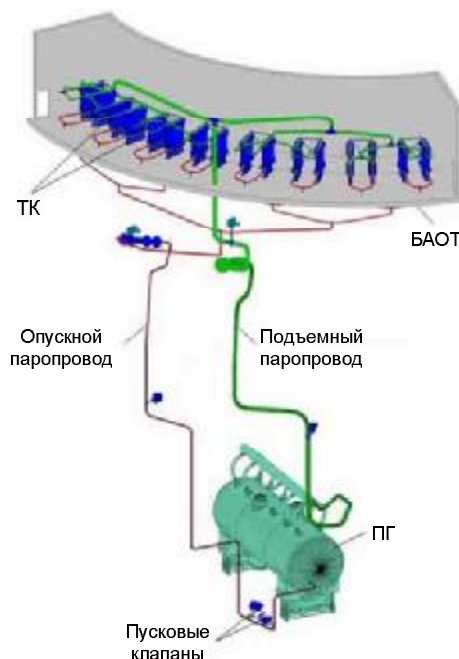


Рис. 8. Компоновка канала СПОТ с БАОТ [7]

«Малый» пусковой клапан имеет привод пассивного типа. Его открытие осуществляется при полном обесточивании по факту незапуска дизельгенераторов. Также предусмотрено автоматическое открытие клапана при аварии с полной потерей питательной воды. Открытие «большого» пускового клапана осуществляется автоматически при отказе активных систем безопасности или дистанционно – оператором.

В таблице представлены характеристики ТК.

Таблица. Характеристики секций ТК

Внешний вид	Характеристики	
	Количество теплообменников, шт.	16
	Количество трубок в теплообменнике, шт	140
	Площадь поверхности, м ²	14,1
	Диаметр теплообменной трубки, мм	16×2
	Перепад высот, м:	
	- подъемный участок	41,1
	- опускной участок	46,5
	Диаметр основного трубопровода подъемного участка, мм	273×20
	Диаметр основного трубопровода опускного участка, мм	108×9
	Расстояние между коллекторами теплообменника, м	1,95

Средняя скорость расхолаживания РУ при открытии «малого» клапана составляет не более 30...35 °C/ч при работе трех каналов СПОТ в аварийных условиях, связанных с полной потерей всех источников переменного тока, а также при аварии с полной потерей питательной воды. Скорость расхолаживания при работе «большого» пускового клапана в основном определяется размером течи из 1-го контура.

При авариях с течью 1-го контура мощность теплоотвода составляет ~150 МВт. Максимальная мощность одного канала СПОТ ПГ при работе «большого» пускового клапана составляет 52 МВт, при работе «малого» пускового клапана – 28 МВт, соответственно.

Система теплоизолирована. В режиме ожидания подъемный трубопровод прогрет до уровня температур 2-го контура, поскольку паровой тракт системы постоянно подключен к паропроводу ПГ. Дополнительные теплотери составляют 0,0125 % от $N_{\text{НОМ}}$.

Основным недостатком использования воды для отвода остаточного тепловыделения является ограниченность ее запаса объемом БАОТ, что лимитирует продолжительность времени, в течение которого обеспечивается надежное расхолаживание РУ без возможности пополнения БАОТ.

Первоначальный вариант СПОТ ПГ для РУ с ВВЭР-1200, разработанный Санкт-Петербургским институтом «Атомэнергопроект», предусматривал запас воды в БАОТ для теплоотвода тремя каналами в условиях полного обесточивания энергоблока в течение 24 часов. Четвертый канал при этом рассматривался как резервный. Для восполнения запасов воды в БАОТ и поддержания работоспособности системы предполагалось использование мобильного оборудования и резервных источников воды на площадке АЭС.

После аварии на АЭС «Фукусима» изменилась концепция управления запроектными авариями и был принят подход, основанный на обеспечении полной автономности и независимости АЭС в течение, как минимум, 72 часов. С учетом новой концепции возможность сохранения РУ в безопасном расхолаженном состоянии в течение 72 ч обеспечивается четырьмя каналами СПОТ ПГ. Автономность РУ при ЗПА с полной потерей источников электроснабжения на период более 72 ч обеспечивается с помощью системы подпитки [7].

На рис. 9 приведены результаты расчетного моделирования изменения тепловой мощности канала СПОТ ПГ и весового уровня в БАОТ для проекта АЭС-2006 с РУ В-491, выполненные с использованием теплогидравлического кода

КОРСАР/ГП [7]. Моделировалась работа трех каналов СПОТ ПГ и постулировалась возможность использования работоспособными каналами запасов воды в баке четвертого нерабочего канала системы.

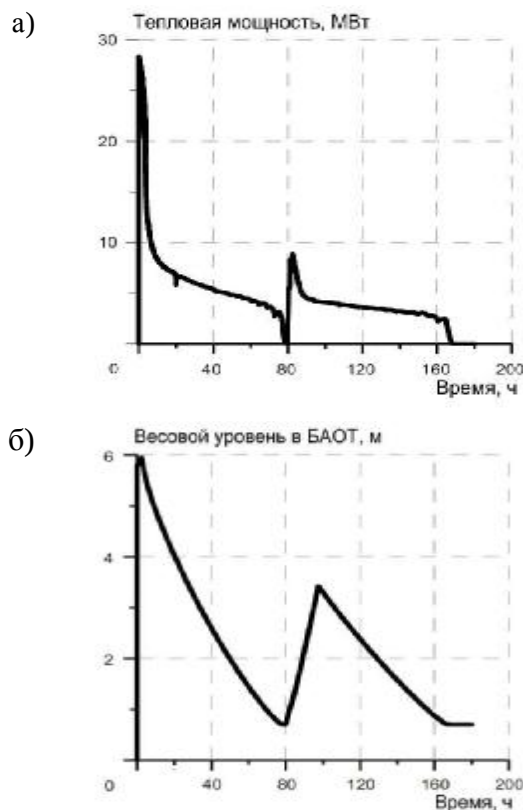


Рис. 9. Результаты расчетного моделирования изменения мощности канала СПОТ ПГ (а) и весового уровня в БАОТ (б) РУ В-491 при теплоотводе выкипающей воде (КОРСАР/ГП) [7]

Полное осушение ТК в работоспособных каналах происходит за 76 ч аварийного процесса (уровень воды составляет 0,7 м от днища бака). По сигналу опорожнения баков СПОТ оператор использует штатную систему подпитки и пополняет все четыре БАОТ с общим расходом 80 м³/ч из резервуаров запаса обессоленной воды общим объемом 1400 м³. Опорожнение баков обессоленной воды наступает, примерно, за 94 ч от начала аварии. После этого происходит повторное опорожнение БАОТ, продолжающееся до момента времени 165 ч от начала аварии (около 7 суток).

На протяжении всего расчетного периода (180 ч) не происходит даже кратковременного осушения а.з. и температура топлива не превышает предельно допустимых значений. Для повторного наполнения емкостей обессоленной воды с целью поддержания работоспособности

СПОТ и сохранения РУ в безопасном расхолаженном состоянии должны быть задействованы другие имеющиеся на площадке АЭС резервные источники.

К недостаткам использования воды для СПОТ следует отнести необходимость ее тепловой защиты в зимний период для предотвращения замерзания в условиях низкой температуры [8].

Несмотря на то, что в отличие от воздуха, теплоотвод к кипящей в БАОТ воде осуществляется при гораздо меньшем располагаемом температурном напоре между 1-ым контуром и водой в БАОТ:

$$T_{1к} - T_{кп} = 300 - 100 = 200 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

этого температурного напора с учетом большой разницы высот в расположении ПГ и ТК более чем достаточно для надежной ЕЦ в контуре СПОТ.

Заключение

Сравнительный анализ использования воздуха или воды в качестве конечного поглотителя остаточного тепловыделения РУ с ВВЭР при работе СПОТ ПГ показал наличие, как преимуществ, так и недостатков обеих сред.

Основными преимуществами воздуха является неограниченность его доступного объема, что формирует условия для практически сколь угодно длительного эффективного отвода остаточного тепловыделения до перехода реактора в устойчивое безопасное состояние.

При использовании воды для отвода теплоты от ТК продолжительность времени, в течение которого обеспечивается надежное расхолаживание РУ, определяется запасом конечного поглотителя теплоты – воды, находящейся в БАОТ.

При отводе теплоты к воздуху обеспечивает большой температурный напор между 1-ым контуром и конечным поглотителем, а также реализуется простая безнапорная схема его движения за счет естественной тяги в шахте с ТК. Достоинством воздуха является и то, что он не нуждается в тепловой защите замерзания.

Главным недостатком воздуха как конечного поглотителя является необходимость регулирования теплоотвода для недопущения чрезмерной скорости расхолаживания при низкой температуре охлаждающего воздуха, а также для поддержания РУ в состоянии горячего резерва. Для этого используется сложное кинематическое устройство – регулятор пассивного типа, изменяющий расхода воздуха поворотом лопаток шиберов в зависимости от давления пара 2-го контура. Кроме того, необходима тепловая защита от замерзания привода шиберов при низкой

температуре окружающего воздуха.

Основное достоинство воды как конечного поглотителя – отсутствие необходимости регулирования отводимой тепловой мощности. Это обеспечивает практически не меняющаяся интенсивность теплоотдачи выкипающей в БАОТ воде и ее постоянная температура.

Низкая интенсивность теплоотдачи воздуху приводит к необходимости увеличения поверхности теплоотвода с помощью внешнего оребрения трубной поверхности ТК и обеспечения высокой скорости движения воздуха за счет использования тяговых участков большой протяженности. Это увеличивает массу и габариты ТК, а также воздушных тяговых участков. Кроме того, в условиях высокой влажности атмосферного воздуха необходима коррозионная защита теплообменных труб ТК.

Большая теплопоглощающая способность воды в БАОТ при ее нагреве и последующем испарении, а также более высокие (по сравнению с воздушным ТК) коэффициенты теплопередачи, позволяют сформировать простую, эффективную и компактную систему отвода теплоты от ТК. СПОТ с водяным ТК не нуждается в протяженных тяговых участках и дефлекторе, что существенно упрощает конструкцию купола оболочки реакторного отделения. Ее масса определяется массой ТК, воды и металлоконструкции БАОТ, а габариты зависят от объема запасенной воды в БАОТ.

Главным недостатком водяного охлаждения ТК является ограниченный запас конечного поглотителя в БАОТ и необходимость организации его пополнения в аварийных условиях теплоотвода с полным длительным обесточиванием. Кроме того, вода нуждается в тепловой защите от замерзания в зимний период.

В силу непредсказуемости характера возможной аварии и использовании вероятностных оценок её протекания, выбор типа конечного поглотителя остаточного тепловыделения РУ будет зависеть от выбранной проектантом концепции управления запроектными авариями.

При этом необходимо учитывать самые неблагоприятные условия, при которых будет протекать аварийный процесс: потеря всех источников энергии, включая аварийные, вероятность и особенности наложения различных исходных событий аварии, необходимость/возможность управления аварийным процессом теплоотвода в условиях полного длительного обесточивания, а также внешние (климатические и техногенные) условия теплоотвода, характерные для конкретной площадки АЭС.

Список литературы

1. База для ТОИ / С. Романова // Атомный эксперт, 2014. – № 11 – 12 (32 – 33). – С. 12 – 24.
2. Логвинов С.А. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР / С.А. Логвинов, Ю.А. Безруков, Ю.Г. Драгунов. – М.: ИКЦ Академкнига, 2004. – 255 с.
3. Полуничев В.И. Регулирующие устройства системы пассивного отвода тепла для АЭС «Куданкулам» (Индия) / В.И. Полуничев, Г.П. Шумайлов, К.Б. Вешняков, П.А. Горбунов // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2011. – № 1(86). – С. 110 – 116.
4. Тупиков Р.А. Экспериментальное обоснование работоспособности теплообменных аппаратов системы пассивного отвода тепла в условиях тропического климата / Р.А. Тупиков, Ю.Г. Драгунов, В.С. Попадчук и др. // Теплоэнергетика, 2006. – № 1. – С. 11 – 14.
5. Лобачев С.М. Испытания на стенде ОКБ «Гидропресс» полномасштабного макета оптимизированного теплообменника СПОТ / С.М. Лобачев [и др.] // Тр. 3-ой Науч.-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск, 2003, Т. 1. – С. 61 – 66.
6. Бахметьев А.М. Задачи расчетно-экспериментального обоснования СПОТ 3О для АЭС нового поколения / А.М. Бахметьев [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Матер. 5-й Межд. научн.-техн. конф. [Электронный ресурс]. – Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2007. – Режим доступа: <file://localhost/F:/TT/Материалы%20конференций/Гидропресс%2007/autorun/article124-ru.htm>. Monday, 7 April 2008 10:40:10.
7. Безлепкин В.В. Совершенствование системы пассивного отвода тепла через парогенераторы на реакторной установке с ВВЭР-1200 в свете событий на АЭС «Фукусима» / В.В. Безлепкин [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Матер. 8-й Межд. научн.-техн. конф. [Электронный ресурс]. – Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс», 2013. <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/autorun/article167-ru.htm>. Tuesday, 1 October 2013 8:10:15.
8. Свириденко И.И. Исследование характеристик пассивной тепловой защиты конечного поглотителя СПОТ реакторной установки с ВВЭР-1000 / И.И. Свириденко, В.А. Тимофеев, Д.В. Шевелев // Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология, 2009. – Вып. 97. – С. 69 – 74.
3. Polunichev V.I., Shumajlov G.P., Veshnjakov K.B., Gorbunov P.A. Control devices of system of passive heat removal for the NPP “Kudankulam” (India). *Tr. NGTU im. R.E. Alekseeva* [Works NGTU of R.E. Alekseev], Nizhny Novgorod, NGTU Publ., 2011, No. 1(86), pp. 110-116. (In Russ.).
4. Tupikov R.A., Dragunov Ju.G., Popadchuk V.S., Harchenko S.A., Bezrukov Ju.A., Harina I.L. Jeksperimental'noe obosnovanie rabotosposobnosti teploobmennyyh apparatov sistemy passivnogo otvoda tepla v usloviyah tropicheskogo klimata. *Teplojenergetika*, 2006, No. 1, pp. 11-14. (In Russ.).
5. Lobachev S.M., et al. Tests at the stand of experimental design bureau “Gidropress” of the full-scale model of the optimized teplokobmennik the PRHRS *Tr. 3-oy Nauch.-tehn. konf. “Obespechenie bezopasnosti AJeS s VVJeR”* [Transactions of the 3th Int. Sc. and Tech. Conf. “Safety Assurance of NPP with VVER”], Podolsk, OKB Gidropress Publ., 2003, Vol. 1, pp. 61-66. (In Russ.).
6. Bahmet'ev A.M., et al. Problems of settlement and experimental justification a containment PRHRS for the NPP of new generation. *Tr. 5-oy Nauch.-tehn. konf. “Obespechenie bezopasnosti AJeS s VVJeR”* [Transactions of the 5th Int. Sc. and Tech. Conf. “Safety Assurance of NPP with VVER”], Podolsk, OKB Gidropress Publ., 2007. Available at: <file://localhost/F:/TT/Materia-ly%20konferencij/Gidropress%2007/autorun/article124-ru.htm> (accessed 07.04.2008).
7. Bezlepkin V.V., et al. Sovershenstvovanie sistemy passivnogo otvoda tepla cherez parogeneratory na reaktornoj ustanovke s VVJeR-1200 v svete sobytij na AJeS “Fukusima”. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2013/autorun/article167-ru.htm> (accessed 01.10.2013).
8. Sviridenko I.I., Timofeev V.A., Shevelev D.V. Research of a passive thermal protection characteristics of WWER-1000 final absorber in cooling reactor facility system. *Vestnik SevGTU. Ser. Mehanika, jenergetika, jekologija* [Journal of the Sevastopol National Technical University], Sevastopol, SevNTU Publ., 2009, Issue 97, pp. 69-74. (In Russ.).

References

1. Romanova S. Baza dlja TOI. *Atomnyj jekspert*, 2014, No. 11–12 (32–33), pp. 12–24. (In Russ.).
2. Logvinov S.A., Bezrukov Ju.A., Dragunov Ju.G. *Jeksperimental'noe obosnovanie teplogidravlicheskoj nadezhnosti reaktorov VVJeR* [Experimental justification of heathydraulic reliability of VVER reactors]. Moscow, IKC Akademkniga Publ., 2004. – 255 p. (In Russ.).

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.658.018

Стабилизация режима кластера ветроэлектрических установок в локальной сети электроснабжения

Л.Н. Канов

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, lnkanov48@mail.ru

Статья поступила 08.06.2016 г.; после доработки 10.06.2016 г.

Аннотация

Построено математическое описание ветроэлектростанции из двух генераторов в виде системы нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений с учетом изменения скорости ветра и вырабатываемой мощности. Обоснована методика оптимального управления с целью стабилизации мощности генераторов. Стабилизацию предложено осуществлять изменением сопротивлений возбуждения генераторов и углов установки лопастей ветроколеса.

Ключевые слова: ветроэлектрическая установка, генератор, скорость ветра, вырабатываемая мощность, стабилизация, сопротивление возбуждения, угол установки лопастей.

Stabilizing of the Regime of Windelectrical Settings Cluster in the Local Network of Electrical supply

L.N. Kanov

Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, lnkanov48@mail.ru

Received 08.06.2016 y.; received in final form 10.06.2016 y.

Abstract

Mathematical description of windelectrical station is built from two generators type of the system of nonlinear algebraic and differential equalizations taking into account a change speed of wind and produced power. The method of optimum control is grounded with the purpose of stabilizing of power of generators. It is suggested to carry out stabilizing the change of resistances of excitation of generators and corners of setting of blades of windwheel.

Keywords: windelectrical setting, generator, speed of wind, produced power, stabilizing, resistance of excitation, corner of setting of blades.

Введение

С расширением применения возобновляемых источников электроэнергии происходит постепенный переход от традиционной системы централизованного производства электроэнергии к ее распределенной генерации. Распределенная генерация означает децентрализованное

производство электроэнергии, осуществляемое путем размещения ветроэлектрических установок (ВЭУ), объединенных в кластеры в непосредственной близости от потребителей и образующих локальную сеть электроснабжения.

Локальные сети позволяют смягчать скачки нагрузки существующих электрических сетей, повышают надежность электроснабжения, под-

держивают надлежащее качество электроэнергии и снижают риск потери устойчивости энергосистемы. Распределенная генерация обеспечивает поддержку в чрезвычайных ситуациях, таких как отключение питания основной сети и снижает масштаб ущерба, что особенно важно в современных условиях.

Вместе с тем, система распределенной генерации в виде кластеров ВЭУ обостряет такие характерные проблемы, как нестабильная мощность, зависящая от ветровой обстановки, увеличение токов коротких замыканий, усложнение оперативного контроля и релейной защиты, а также системы управления.

В то время, как математическое описание мощных систем электроснабжения с ветротурбинами, работающими на энергосистему, сравнительно подробно исследовано [1], анализу режимов систем распределенной генерации уделяется меньше внимания.

В большинстве работ, например, [2-4] приводится описание, усовершенствование и расчет конструкций ВЭУ и их узлов. В других работах [5] для управления поворотом лопастей ветроколеса предлагается использовать нейронные сети. Оптимизация режимов одиночной ВЭУ рассмотрена в [6], где исследована эффективность ВЭУ переменного тока в зависимости от регулировки угла установки лопастей ветроколеса. Регулирование ВЭУ предлагается выполнять с помощью pitch-системы с запаздыванием. В работах [7-9] изложен подход к анализу и оптимизации режима единичной ВЭУ постоянного и переменного тока.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной научной работы является исследование зависимости режима системы распределенной генерации в локальной сети электроснабжения постоянного тока небольшой мощности от скоростей ветра на ВЭУ, объединенных в кластер.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- построить в виде системы нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений математическое описание ВЭУ, работающих на локальную сеть;
- определить зависимости сопротивлений возбуждений генераторов от скорости ветра, необходимые для стабилизации вырабатываемой мощности;
- оценить эффективность стабилизации мощ-

ности путем изменения углов установки лопастей в зависимости от ветровых условий на генераторах ВЭУ.

Математическое описание ВЭУ

Кластеры ветроэлектрических установок, работающих параллельно на сеть, содержат обычно несколько ветрогенераторов. Рассмотрим особенности их математического описания на примере двух параллельно включенных генераторов. Башни подобной ветроэлектростанции расположены на значительном расстоянии друг от друга, и на их ветроколеса воздействует ветер с различной скоростью $V_1(t)$ и $V_2(t)$.

Упрощенная модель ветроэлектростанции изображена на рис. 1.

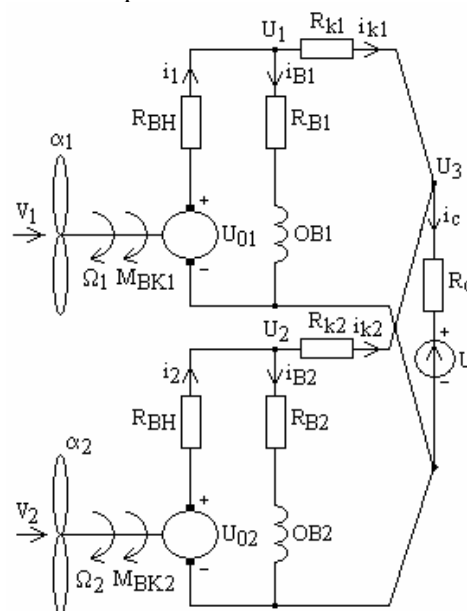


Рис. 1. Упрощенная схема ветроэлектростанции из двух генераторов

Генераторы соединены с приемным узлом сети кабелями, сопротивления которых обозначены R_{k1} и R_{k2} , напряжение на шине подсоединения кабелей равно U_3 . Эта шина соединена с входом сети кабелем с сопротивлением R_c . Напряжение U сети поддерживается постоянным. Напряжения на выходах генераторов обозначены U_1, U_2 , токи генераторов – I_1, I_2 , токи кабелей – I_{k1}, I_{k2} , токи в обмотках возбуждения генераторов – I_{B1}, I_{B2} , ток, идущий в сеть – I_c , регулируемые сопротивления обмоток возбуждения обозначены R_{B1}, R_{B2} . Угловые скорости вращения генераторов – Ω_1, Ω_2 . Подобная же структура сохраняется и при большем количестве генераторов.

Вращающий момент ветроколеса зависит от его скорости вращения Ω , диаметра D , скорости ветра V и угла установки лопастей α . Эта зависимость исследована для часто применяемых ветроколес с тремя лопастями и горизонтальной осью вращения [1]

$$M_{\text{БК}}(\Omega, V, \alpha) = M_0(Z(\Omega, V), \alpha) \frac{D^3 \rho \pi V^2}{16}.$$

Удельный момент $M_0(Z(\Omega, V), \alpha)$ зависит от коэффициента быстроходности $Z(\Omega, V)$. На рис. 2 изображены графики зависимости вращающего момента от скорости вращения, скорости ветра и угла установки лопастей.

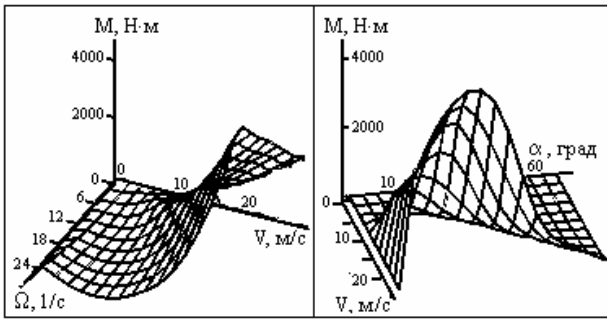


Рис. 2. Зависимость вращающего момента от скорости ветра, угла установки лопастей и скорости вращения ветроколеса

Насыщение магнитной цепи генератора аппроксимируется выражением

$$\Phi(i_B) = a \cdot \arctg(bi_B) + ci_B,$$

ЭДС генератора имеет вид

$$u_0(t) = c\Omega\Phi,$$

электромагнитный момент –

$$M_G = c\Phi(i_B) \frac{c\Omega\Phi(i_B) - U}{R_{\text{BH}}}.$$

Уравнения механического равновесия на валах генераторов определяются выражениями

$$\begin{cases} M_{\text{БК1}} = k_{\text{ТР}}\Omega_1 + c\Phi_1 \frac{c\Omega_1\Phi_1 - U_1}{R_{\text{BH}}}; \\ M_{\text{БК2}} = k_{\text{ТР}}\Omega_2 + c\Phi_2 \frac{c\Omega_2\Phi_2 - U_2}{R_{\text{BH}}}. \end{cases} \quad (1)$$

Токи генераторов подсчитываются следующим образом:

$$i_i = \frac{U_{0i} - U_i}{R_{\text{BH}}}, \quad i_{Bi} = \frac{U_i}{R_{Bi}}, \quad i = 1, 2; \quad (2)$$

$$i_{k1} = \frac{U_1 - U_3}{R_{K1}}, \quad i_{k2} = \frac{U_2 - U_3}{R_{K2}}, \quad i_c = \frac{U_3 - U}{R_C}.$$

На основании выражений (1), (2) получаем уравнения для определения напряжений U_1, U_2, U_3

$$\begin{cases} U_1 \left(\frac{1}{R_{\text{BH}}} + \frac{1}{R_{B1}} + \frac{1}{R_{K1}} \right) - \frac{U_3}{R_{K1}} = \frac{c\Omega_1\Phi_1}{R_{\text{BH}}}; \\ U_2 \left(\frac{1}{R_{\text{BH}}} + \frac{1}{R_{B2}} + \frac{1}{R_{K2}} \right) - \frac{U_3}{R_{K2}} = \frac{c\Omega_2\Phi_2}{R_{\text{BH}}}; \\ U_3 \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{K1}} + \frac{1}{R_{K2}} \right) - \frac{U_1}{R_{K1}} - \frac{U_2}{R_{K2}} = \frac{U}{R_c}. \end{cases} \quad (3)$$

Мощности, вырабатываемые генераторами и передаваемые в кабельные линии и в сеть, имеют вид

$$P_1 = U_1 i_{k1} = \frac{U_1 \cdot (U_1 - U_3)}{R_{K1}}; \quad (4)$$

$$P_2 = U_2 i_{k2} = \frac{U_2 \cdot (U_2 - U_3)}{R_{K2}}; \quad P_c = U \cdot i_c.$$

Анализ нерегулируемого режима выполнен по уравнениям (1), (2) и (3) при следующих параметрах ВЭУ: $R_c = 0,5 \text{ Ом}$, $U = 220 \text{ В}$,

$$R_{K1} = R_{K2} = 0,1 \text{ Ом}, \quad \alpha_1 = \alpha_2 = 20^\circ,$$

$$R_{B1} = R_{B2} = 200 \text{ Ом}.$$

Скорость ветра первого генератора полагалась постоянной $V_1 = 12 \text{ м/с}$, второго – изменялась от 8 м/с до 16 м/с . Мощности подсчитывались по формулам (4). На рис. 3 изображены графики зависимостей параметров режима от скорости ветра V_2 .

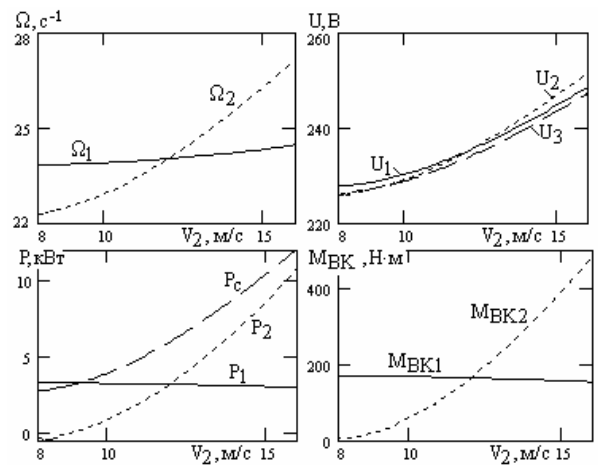


Рис. 3. Зависимость параметров режима от скорости ветра на втором генераторе

Графики показывают, что при изменении скорости ветра одного из генераторов изменяются режимы работы обоих генераторов. С падением скорости ветра V_2 снижаются напряжения и скорости вращения обоих генераторов; падает мощность второго генератора. При скорости $V_2 = 8,8$ м/с второй генератор начинает поглощать мощность первого и сети. При увеличении скорости V_2 мощность первого снижается, и он, в свою очередь, также начинает поглощать мощность. Эти явления оправдывают усилия, направленные на стабилизацию мощностей генераторов при изменениях скорости ветра.

Стабилизация режима генераторов

Для стабилизации мощности генераторов рассмотрим две возможности: изменение сопротивлений возбуждения и изменение углов установки лопастей ветроколес. Зафиксируем требуемые уровни мощностей генераторов P_{01}, P_{02} и из уравнений (3), (4) получаем напряжения U_1, U_2, U_3 , обеспечивающие необходимые мощности. При $P_{01} = P_{02} = 3$ кВт получаем $U_1 = U_2 = 234$ В, $U_3 = 233$ В. Далее, из уравнений (1) выражаем скорости и с использованием найденных значений напряжений получаем возможность определения стабилизирующих параметров.

Полагая углы установки лопастей постоянными $\alpha_1 = \alpha_2 = 20^\circ$, при $V_1 = 12$ м/с для различных скоростей V_2 получаем стабилизирующие значения сопротивлений возбуждения R_{B1}, R_{B2} . Расчеты показали, что сопротивление R_{B1} мало зависит от скорости ветра V_2 и составляет 207,4 Ом. Остаются практически неизменными скорость и момент первого генератора: $\Omega_1 = 24,4$ с⁻¹, $M_{BK1} = 152,9$ Н·м. Графики зависимостей R_{B2}, Ω_2 и M_{BK2} изображены на рис. 4

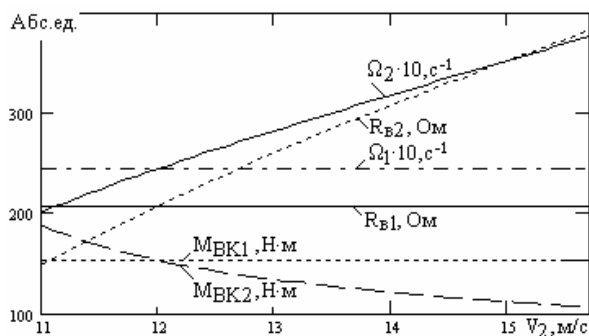


Рис. 4. Стабилизация режима изменением сопротивления возбуждения

Графики показывают, что с ростом V_2 сопротивление R_{B2} должно расти, при этом растет и скорость Ω_2 , момент M_{BK2} снижается. При скорости $V_2 < 9,7$ м/с решения уравнений (1) не существует, т.е. стабилизации мощностей путем изменения R_{B2} осуществить уже нельзя.

Для оценки эффекта стабилизации изменением углов установки лопастей полагаем $R_{B1} = R_{B2} = 200$ Ом и решением преобразованных указанным выше образом уравнений (1) получаем значения стабилизирующих углов установки лопастей. Решение осуществлялось при тех же самых значениях скоростей ветра, что и при расчете сопротивлений: $V_1 = 12$ м/с и $V_2 = 11, 12 \dots 16$ м/с. При $V_1 = V_2 = 12$ м/с значения углов также были одинаковы $\alpha_1 = \alpha_2 = 20,3^\circ$. С ростом V_2 угол α_2 увеличивается. При снижении скорости ветра V_2 до 9,8 м/с угол α_2 падает до минимальной величины, и стабилизации мощностей уже не происходит. Графики изменения параметров стабилизированного режима при изменении скорости ветра изображены на рис. 5.

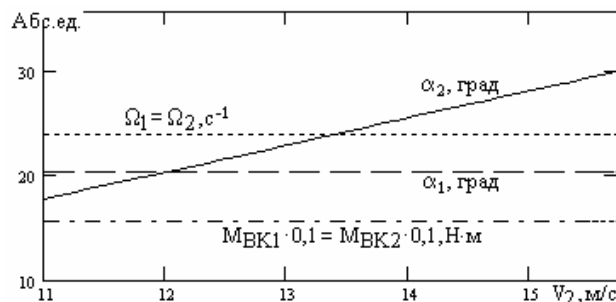


Рис. 5. Стабилизация режима изменением угла установки лопастей

Для иллюстрации рассчитан стабилизированный режим ветроэлектростанции при изменяющихся скоростях ветра обоих генераторов. Расчет выполнялся решением уравнений (1) – (3) с учетом инерционности как механической части ВЭУ, так и ее электромагнитной цепи. Инерционность механической части учитывалась введением динамических моментов ветроколес $J_1 \frac{d\Omega_1}{dt}, J_2 \frac{d\Omega_2}{dt}$ в правые части уравнений (1). Электромагнитная инерция имитировалась напряжением самоиндукции в обмотках возбуждения. Поэтому токи возбуждения описывались уравнениями

$$\begin{cases} \left(\frac{ab}{1+(bi_{B1})^2} + c \right) \frac{di_{B1}}{dt} + R_{B1}i_{B1} = U_1; \\ \left(\frac{ab}{1+(bi_{B2})^2} + c \right) \frac{di_{B2}}{dt} + R_{B2}i_{B2} = U_2. \end{cases}$$

На рис. 6 изображены графики работы ВЭУ при стабилизации режима с помощью углов установки лопастей по рис.5: $\alpha_1(V_1(t), V_2(t))$ и $\alpha_2(V_1(t), V_2(t))$. Уравнения (1) решались при сопротивлениях $R_{B1} = R_{B2} = 200 \text{ Ом}$.

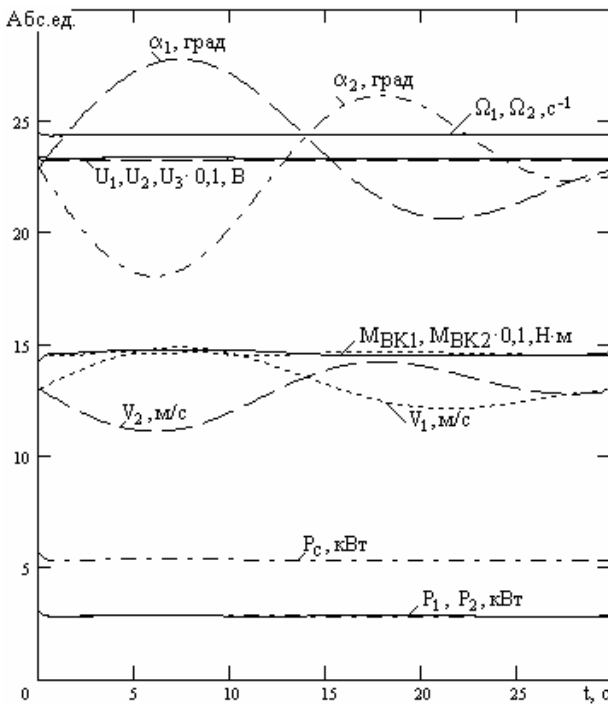


Рис. 6. Стабилизированный режим при изменении скоростей ветра на обоих генераторах

Графики показывают, что стабилизация мощностей, напряжений и скоростей генераторов при изменении углов установки лопастей выполняется.

Предложенная методика стабилизации может быть распространена на три и более генератора, работающих параллельно на локальную сеть R_0, U_0 . В этом случае соответственно увеличивается количество уравнений (3) для напряжений генераторов $U_1, U_2, U_3, \dots$, уравнений (4) для мощностей и уравнений динамики.

Сообразуясь с результатами, отраженными на рис. 4-5, можно ожидать, что стабилизирующие параметры (сопротивления возбуждения и углы установки) будут определяться, в основном, каждым генератором в отдельности. Дру-

гими направлениями стабилизации режимов генераторов в составе кластеров ВЭУ могут быть следующие. Перспективно использование механизма вылета лопасти с целью увеличения ее длины, так как увеличение диаметра ветроколеса существенно увеличивает вращающий момент. Еще одним средством регулирования является ориентация плоскости вращения ветроколеса на ветер: изменение угла между вектором скорости ветра и плоскостью вращения ветроколеса. При отклонении этого угла от 90° вращающий момент снижается.

Перспективным направлением является импульсная система стабилизации мощности, рис. 7, которая воздействует на вращающий момент дискретными отклонениями углов установки лопастей, что исключает непрерывную работу механизма установки угла лопасти. При выходе мощности генератора из коридора допустимого диапазона с изменением скорости ветра на механизм установки лопастей подаются импульсы неизменной длительности и амплитуды. Это приводит к появлению отклонения угла $\Delta\alpha$ неизменной величины. Знак импульсов и расстояние между ними выбираются в зависимости от величины и скорости ухода мощности из допустимого диапазона. Этот метод также не является идеальным, так как вызывает колебания вращающего момента ветроколеса.

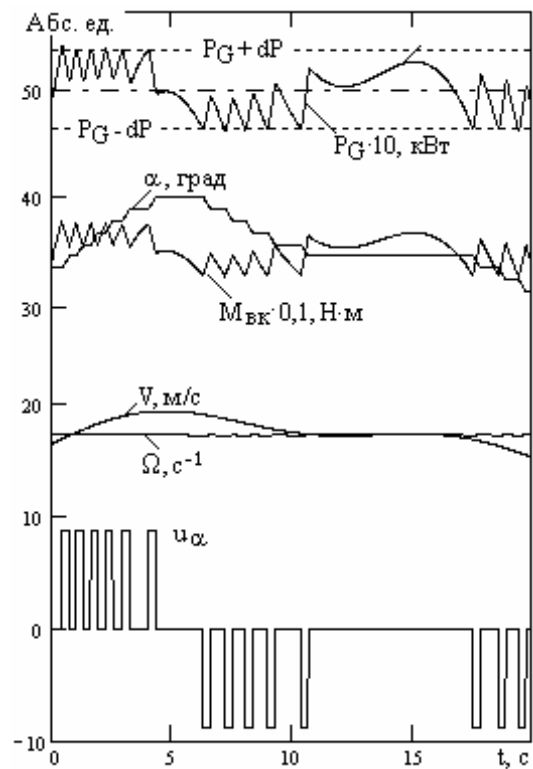


Рис. 7. Импульсная стабилизация мощности

Заключение

Обоснована методика оптимального управления генераторами, входящими в кластер ВЭУ, с целью стабилизации вырабатываемой мощности. Управление возможно выполнять изменением сопротивлений генераторов или изменением углов установки лопастей. Последнее более предпочтительно, так как не сопровождается изменением скоростей генераторов. Изменение же сопротивлений приводит к соответствующему изменению скорости. Подобные выводы справедливы и для кластеров с большим количеством параллельно работающих генераторов.

Практическое значение полученных результатов состоит в обосновании требований к проектированию электронных устройств системы управления ветроэлектростанцией, в частности – исполнительными двигателями механизма изменения угла установки лопастей, а также изменения сопротивлений возбуждения. Перспективным направлением дальнейших исследований является построение макетов подобной системы, а также анализ режимов ВЭУ, работающих автономно от сети.

Список литературы

1. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Ветроэнергетика / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Харьков: изд-во ХАИ, 2004. – 519 с.
2. Безруких П.П. Использование энергии ветра / П.П. Безруких. – М.: Колос, 2008. – 196 с.
3. Зубова Н.В. Анализ приоритетности контуров управления ветроэнергетической установкой / Н.В. Зубова, С.Н. Удалов, В.В. Манусов // Электро, 2015. – № 6. – С. 27 - 31.
4. Лукутин Б.В. Энергоэффективные системы генерирования электроэнергии для автономных ветроэлектростанций / Б.В. Лукутин, О.Б. Лукутин, Е.Б. Шандарова // Изв. Томского политехн. ун-та. Сер. Технические науки, 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 203 - 206.
5. Мустафаев Р.И. Сравнительная оценка эффективности функционирования современных ветроэлектрических установок / Р.И. Мустафаев, Л.Г. Гасанова // Известия ВУЗов. Сер. Электромеханика, 2008. – № 4. – С. 57 - 60.
6. Буяльский В.И. Оптимизация системы автоматического управления ветроэлектрической установкой / В.И. Буяльский // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. – Севастополь: СевНТУ, 2010. – Вып. 12. – С. 164 - 167.
7. Канов Л.Н. Расчет режима системы автономного электроснабжения переменного тока малой мощности / Л.Н. Канов // Электротехника и электро-механика, 2011. – № 4. – С. 29 -33.
8. Канов Л.Н. Оптимизация режима ветроэлектрической установки постоянного тока по максимуму мощности / Л.Н. Канов // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. – Севастополь: СевНТУ, 2011. – Вып. 13. – С. 91 - 94.
9. Канов Л.Н. Устойчивость режимов автономной ветроэлектрической установки малой мощности / Л.Н. Канов, Ю.В. Матвеев, Е.И. Зарицкая // Вестник СевНТУ: сб. науч. тр. – Севастополь: СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология. – Вып. 119. – 2011. – С. 90 - 93.

References

1. Krivtsov V.S., Oleinikov A.M., Uakovlev A.I. *Neischerpaemua energiuu. Vetroenergetika* [Inexhaustible energy. Vetroenergetika]. Harcov, HAI Publ., 2004, 519 p.
2. Bezrukih P.P. *Ispolzovanie energii vetra* [Use of energy of wind]. Moscow, Kolos Publ., 2008, 196 p.
3. Zubova N.V., Udalov S.N., Manusov V.V. Analysis of priority of contours of control the windenergy setting. *Electro*, 2015, No. 6, pp. 27 - 31.
4. Lukutin B.V., Lukutin O.B., Shandarova E.B. Energoeffektivnye systems of generuting of electric power for autonomous windelectric settings. *Izv. Tomskogo politehn. un-ta. Ser. Tekhnicheskie nauki*, 2005, Vol. 308. No. 7. pp. 203 - 206.
5. Mustafaev R.I., Gasanova L.G. Comparative estimation of efficiency of functioning of modern windelectric settings. *Izvestiua VUZov. Ser. Elektromechanica*, 2008, No. 4, pp. 57 - 60.
6. Buualskii V.I. Optimization of the system of automatic control the windelectric setting. *Optimizatsiya proizvodstvennykh protsessov* [Optimization of Production Processes], Sevastopol, SevNTU Publ., 2010, Issue 12, pp. 164 - 167.
7. Kanov L.N. Calculation of the mode of the system of autonomous electrosupply of alternating current of small-power. *Elektrotehnika i Elektromechanika*, 2011, No. 4, pp. 29 - 33.
8. Kanov L.N. Optimization of the regime of the windelectric setting of direct-current on a maximum of power. *Optimizatsiya proizvodstvennykh protsessov* [Optimization of Production Processes], Sevastopol, SevNTU Publ., 2011, Issue 13, pp. 91 - 94.
9. Kanov L.N. Matveev U.V., Zaritskaua E.I. Stability of the modes of the autonomous windelectric setting of small power. *Vestnik SevNTU. Ser. Mechanika, energetika, ekologiuu*. [Announcer SEVNTU. Series Mechanics, energy, ecology], Sevastopol, SevNTU Publ., 2011, Issue 119, pp. 90 - 93.

УДК 621.311.243.002

Проектирование и эксплуатация маломощной солнечной энергоустановки

И.И. Марончук¹, А.А. Парфёнов², И.Б. Широков³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹igimar@mail.ru, ²parfonov777@gmail.com, ³shirokov@ieee.org

Статья поступила 17.05. 2016 г.; после доработки 19.05.2016 г.

Аннотация

Рассмотрена методика проведения моделирования поведения солнечных элементов при различных условиях их эксплуатации с целью оптимального выбора комплектующих для создания солнечных станций. Для этих целей использовали программный пакет MATLAB/Simulink. Разработаны модели для расчета вольт-амперных и мощностных характеристик солнечной станции при различных температурах работы солнечных элементов и их различном количественном составе. Полученные в результате моделирования данные позволили дать необходимые рекомендации для проектирования солнечной станции. В процессе мониторинга рынка региона и учитывая результаты проведенного моделирования, было выбрано основное оборудование и собрана энергетическая солнечная установка. Проведен мониторинг ее работы, который показал хорошую воспроизводимость расчетных и экспериментальных результатов.

Ключевые слова: солнечная станция, солнечный элемент, вольт-амперная характеристика, моделирование, электроэнергия.

Design and Operation of Low-Power Solar Power Plant

I.I. Maronchuk¹, A.A. Parfenov², I.B. Shirokov³¹ Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia.
¹igimar@mail.ru, ²parfonov777@gmail.com, ³shirokov@ieee.org

Received 17.05.2016 y.; received in final form 19.05.2016 y.

Abstract

Methods of solar cells behavior modeling at different conditions of their operation with a view to optimize the choice of components to create solar power plants are concerned. To achieve this purpose MATLAB / Simulink software package have been used. The solar station current-voltage and power characteristics calculation models at different temperatures and different quantitative composition of solar cells are developed. Achieved data admitted to produce required recommendations for the solar station engineering. Considering the results of the modeling during region market monitoring the basic solar equipment was chosen and the solar power installation collected was assembled. The solar power installation operation monitoring showed good reproducibility of calculated and experimental results.

Keywords: solar station, solar cell, the current-voltage characteristic, modeling, electricity.

Введение

Солнечная фотоэлектрическая энергетика является одной из наиболее быстро развивающихся областей не только в энергетике, но и среди других отраслей народного хозяйства [1, 2]. В последнее время это приводит к значительному снижению цен на электроэнергию, выраба-

тываемую солнечными станциями (СС). Специалисты считают, что в ближайшем будущем цена за один ватт энергии, вырабатываемой СС, при условии ее эксплуатации не менее 15 лет, будет приближена к стоимости электроэнергии, вырабатываемой традиционными методами [3, 4]. С возвращением Крыма и г. Севастополя в состав РФ особенно остро встал вопрос об энергетиче-

ской независимости этих территорий. Вместе с тем, регион характеризуется следующими особенностями развития: наличие одного из самых высоких уровней солнечной инсоляции на территории РФ, возрождение рекреационной зоны, добыча местных ископаемых энергетических ресурсов в количестве, не достаточном для обеспечения региона собственной электрической энергией. Все это делает развитие солнечной энергетики в регионе весьма актуальным. Экологически чистые тепловая и фотоэлектрическая энергии, источником которых является неисчерпаемая, возобновляемая, децентрализованная энергия Солнца, может позволить населению, проживающему в удалении от питающих электросетей, самостоятельно решать проблемы энергоснабжения. При этом становится актуальным моделирование поведения элементов СС при различных условиях их эксплуатации с целью оптимального выбора комплектующих для создания каждой индивидуальной СС.

Постановка цели задач научной исследования

Целью настоящей работы являлся выбор оптимального оборудования в процессе проектирования, монтажа и контроля параметров эксплуатации СС с использованием программного пакета MATLAB/Simscapе, анализ и подбор основного и вспомогательного оборудования для СС перспективных к использованию в частных домовладениях.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: построение математической модели с помощью пакета MATLAB/Simulink; моделирование работы СС при различных температурах; разработка практических рекомендаций по выбору основного оборудования для строительства СС; подбор оптимальных комплектующих и монтаж энергетической фотоэлектрической установки; анализ работы собранной СС в летний период.

Моделирование фотоэлектрической станции

Для проведения исследований был выбран частный жилой дом с плоской крышей, расположенный в пригороде Алушты. Задача заключалась в бесперебойном электроснабжении объекта, осуществляемом как от городской электрической сети, так и от СС. Для моделирования работы разрабатываемой СС из существующих специализированных и общенаучных программ,

нами был выбран MATLAB. Данный программный продукт позволяет моделировать широкий спектр элементов силовой электроники, что дает возможность изучать поведение всех основных компонентов СС. При расчете к модели СС предъявляли ряд требований:

- точное описание характеристик (вольт-амперной характеристики (ВАХ), мощностной характеристики), зависящих от температуры, освещенности и окружающей среды;
- точное преобразование ВАХ солнечных элементов при различных характеристиках отдельных частей СС.

Указанные требования определяются пределами конструктивного допуска. В зависимости от решаемой задачи точность в определенных точках может изменяться, для этого использовали различные модели солнечных элементов (СЭ). Например, для анализа выходной мощности фотоэлектрического модуля наибольшая точность должна быть получена около рабочей точки ВАХ и может быть снижена около точек короткого замыкания и напряжения холостого хода, т.е. в зависимости от поставленной задачи более точно передается та или иная часть ВАХ и используются различные модели СЭ. ВАХ СЭ представляет собой нелинейную и неявную функцию. Таким образом, аналитическая модель СС может быть получена только путем соединения СЭ идентичных характеристик.

Моделирование ВАХ позволяет решать следующие задачи:

- определение потерь фотоэлектрического СЭ;
- изменение ВАХ при частичной или полной затененности отдельных СЭ или всего модуля;
- влияние повреждения элементов СС;
- надежность СЭ и фотоэлектрической станции [5].

Схема замещения (рис. 1), которую используют для моделирования фотоэлектрического элемента в MATLAB/Simulink [6], состоит из источника фототока двух диодов D1 и D2, через которые протекают токи насыщения, параллельного и последовательного резисторов.

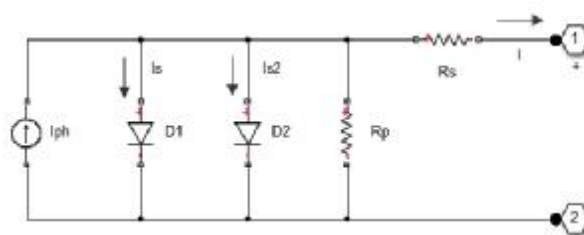


Рис. 1. Схема замещения фотоэлемента MATLAB/Simscapе

Уравнение (1) служит для описания ВАХ элемента “Solar Cell”.

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(e^{\frac{(V + I \cdot R_s)}{N \cdot V_t}} - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left(e^{\frac{(V + I \cdot R_s)}{N_2 \cdot V_t}} - 1 \right) - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_p}, \quad (1)$$

где: I_{ph} – фототок;

I_s – ток насыщения первого диода;

I_{s2} – ток насыщения второго диода;

R_s – последовательное сопротивление;

R_p – параллельное сопротивление.

V_t – термическое напряжение;

N – коэффициент эмиссии первого диода;

N_2 – коэффициент эмиссии второго диода;

V – напряжение на зажимах солнечного элемента.

Параметры I_{ph} , I_s , I_{s2} , R_s , R_p являются зависимыми от температуры СЭ.

Для моделирования СС использовали последовательное соединение блоков “Solar Cell”. Модели для исследования СС, отображенные на рис. 2, [7] позволили получить семейство ВАХ (рис. 3) при различных температурах работы СЭ и их различном количественном составе. При расчетах параметры интенсивности солнечного излучения задавались равными 1000 Вт/м². Расчетная мощность станции должна была составлять 3 кВт. Для проверки точности моделирования выполняли сравнение характеристик с двенадцатью солнечными модулями One-Sun FSM 250P суммарной мощностью 3 кВт.

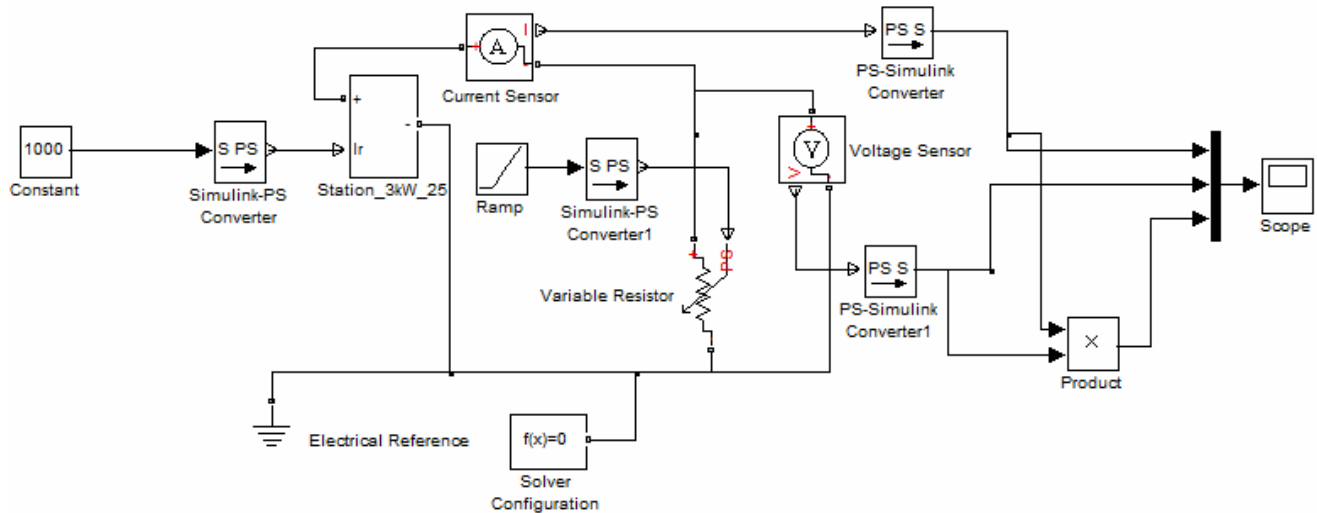


Рис. 2. Модели для снятия ВАХ и мощностных характеристик при различных температурных режимах

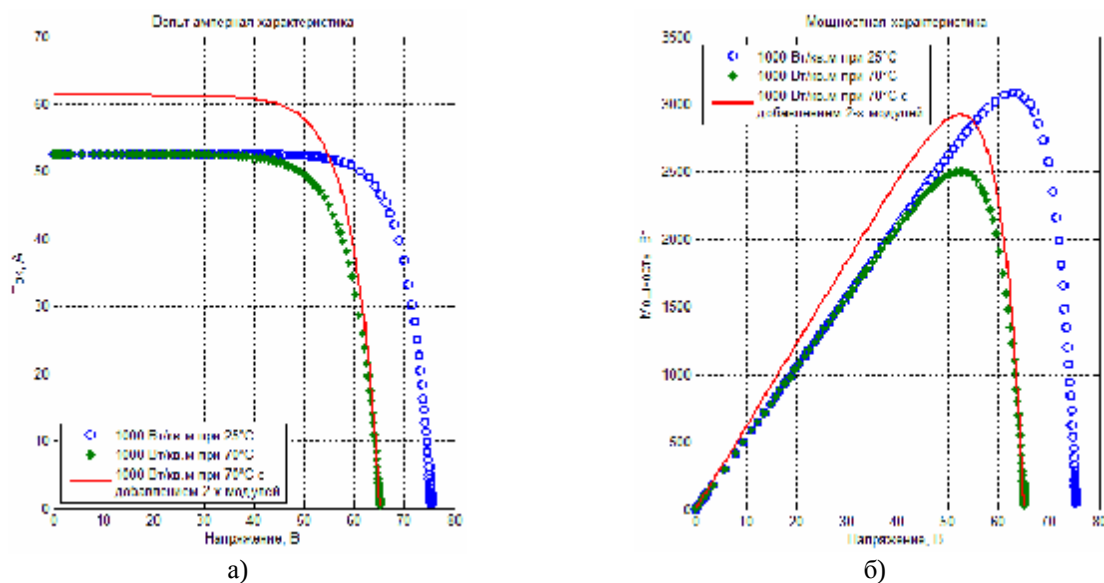


Рис. 3. Расчетные характеристики СС при различных температурах работы СЭ и их различном количественном составе: а) – вольт-амперная характеристика; б) – мощностная характеристика

Из рис. 3 видно, что при температуре работы СЭ 25 °С (при которой производители солнечных модулей показывают рабочие характеристики СЭ) расчетные значения полностью соответствуют заявленной мощности станции. При нагреве панелей до 70 °С мощность СС падает на 550 Вт, что говорит о несоответствии заявленным характеристикам при ее штатной работе. Как видно из рис. 3, для полного соответствия заявленным характеристикам к СС необходимо добавить 2 дополнительных модуля суммарной мощностью 500 Вт. В процессе мониторинга рынка региона и учитывая результаты проведенного моделирования, как оптимальное (цена-качество), было выбрано следующее основное оборудование для сборки энергетической солнечной установки: фотоэлектрические панели One-Sun FSM 250P общей мощностью 3 кВт; контроллер заряда ViewStar VS5048N; 16 аккумуляторных батарей Sprinter XP12V3000 емкостью 93 Ач каждая; соединенных комбинировано, по четыре последовательно и по четыре параллельно; инвертор ПРОГРЕСС-48-6000-HYBRID, однофазный, мощностью 5 кВт, с возможностью программирования и совместной работы с электросетью, что обеспечивает бесперебойное снабжение потребителя электроэнергией в случае разряда аккумуляторных батарей.

Общая схема подключения оборудования СС показана на рис. 4 [8].

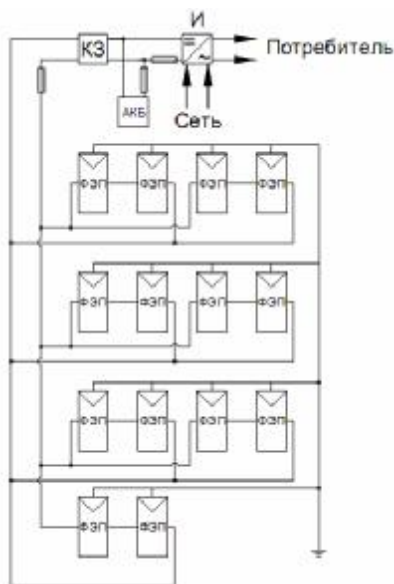


Рис. 4. Схема станции

Станция была установлена на плоской крыше объекта, где с целью обеспечения максимальной энергетической выработки солнечные фотоэлектрические панели (ФЭП) были разме-

щены под углом 40° и ориентированы на юг [9].

Прогнозируемая величина выработки СС электроэнергии в период август-сентябрь 2015 г. составила 678,1 кВт·ч, а реальная контролируемая выработка 508,57 кВт·ч. Это обусловлено изменением энерговыработки панели из-за температурных колебаний и отклонением статистических данных от конкретного года и стационарной установкой ФЭП.

На рис. 5 показано суточное изменение генерирования тока ФЭП в пасмурную погоду.

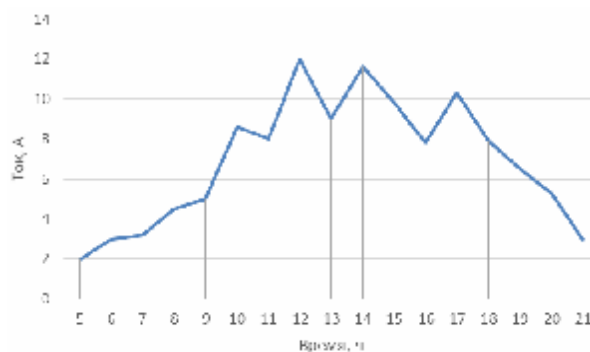


Рис. 5. График суточного изменения тока солнечной панели в пасмурную погоду

На рис. 6 показана среднесуточная энерговыработка станции за август месяц 2015 г.

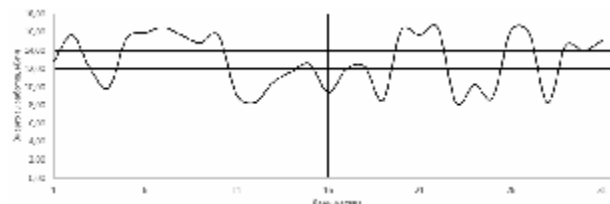


Рис. 6. Среднесуточная энерговыработка за август месяц

В связи с небольшим временем мониторинга СС и объекта, на котором она установлена, пока рано говорить о ее круглогодичных эксплуатационных характеристиках. Однако стоит отметить, что за два месяца эксплуатации станции потребитель ни разу не был переключен на городскую сеть электропитания. Это свидетельствует о правильном выборе оборудования и комплектующих для данного объекта. Полученные данные доказывают эффективность применения СС в качестве автономного источника энергии для подобных объектов. Увеличение доли энерговыработки при использовании таких СС будут способствовать энергонезависимости крымского полуострова от внешних поставок электроэнергии.

Заключение

Отработана методика проведения моделирования поведения солнечных элементов при различных условиях их эксплуатации с целью оптимального выбора комплектующих для создания солнечных станций с помощью программного пакета MATLAB/Simulink. Разработаны модели для расчета вольт-амперных и мощностных характеристик солнечной станции при температурных условиях ее работы в 25 °С и 70 °С и интенсивности солнечного излучения 1000 Вт/м², расчетная мощность станции 3 кВт. Показано, что при нагреве панелей до 70 °С мощность СС падает на 550 Вт, что говорит о несоответствии заявленным характеристикам при ее штатной работе. Полученные в результате моделирования характеристики позволили дать необходимые рекомендации для проектирования солнечной станции мощностью 3 кВт. В процессе мониторинга рынка региона и учитывая результаты проведенного моделирования, было выбрано основное оборудование и собрана энергетическая солнечная установка. Проведенный мониторинг ее работы показал хорошую воспроизводимость расчетных и экспериментальных результатов, что подтверждает правильность выбранной комплектации для сборки солнечной станции.

Список литературы

1. Безруких П.П. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П.П. Безруких. – СПб.: Наука, 2002. – 314 с.
2. Sumathi S. Solar PV and Wind Energy Conversion Systems / Surekha. - Springer International Publishing, Switzerland, 2015. 807 p.
3. Jeger-Waldau A. PV Status Report 2013 /Luxembourg:Publications Office of the European Union, 2013, 58 p.
4. Jeger-Waldau A. PV Status Report 2014 /Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014, 50 p.
5. Бордина Н.М. Моделирование вольт-амперных характеристик солнечных элементов и солнечных батарей / Н.М. Бордина // Электротехническая промышленность. Сер. 22, Хим. и физ. источники тока. Обзор информ, 1986. – Вып. 1 (7). – С. 1 - 64.
6. Mathworks он-лайн помощь по работе с программным продуктом MATLAB 2016 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/physmod/elec/ref/solarcell.html?requestedDomain=www.mathworks.com>
7. Парфенов А.А. Особенности проектирования и эксплуатации маломощной солнечной энергоу-

становки в условиях Крыма / А.А. Парфенов, И.И. Марончук, И.Б. Широков // Материалы российской конференции «Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики», 16 - 18 ноября 2015. Санкт-Петербург. – СПб.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе. 2015. – С. 244 – 245.

8. Парфенов А.А. Моделирование работы солнечной фотоэлектрической панели с использованием пакета MATLAB/Simscape / А.А. Парфенов // Материалы третьего Международного форума «Возобновляемая энергетика: Пути повышения энергетической и экономической эффективности» - REENFOR-2015. 17-19 ноября 2015 г. – Ялта, 2015. – С. 171 - 176.
9. Breakers L.V. Technical Application Papers Photovoltaic plants. (ABB SACE), 2010, No. 10, 107 p.

References

1. Bezrukih P.P. *Resursy i effektivnost' ispol'zovaniya vozobnovljaemyh istochnikov energii v Rossii* [Resources and efficiency of renewable energy in Russia]. St. Petersburg, Nauka, 2002, 314 p.
2. Sumathi S., Ashok Kumar L., Surekha P. *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems*. Switzerland, Springer International Publishing, 2015. 807 p.
3. A. Jeger-Waldau *PV Status Report 2013*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013, 58 p.
4. A.Jeger-Waldau *PV Status Report 2014*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014, 50 p.
5. Bordina H.M., Letin V.A. Modelirovanie vol't-ampernyh harakteristik solnechnyh elementov i solnechnyh batarej [Simulation of current-voltage characteristics of solar cells and solar panels], 1986, 64 p.
6. *Mathworks on-lajn pomoshh' po rabote s programnym produktom MATLAB 2016* [Mathworks online help using the software package MATLAB 2016] –Available at: <http://www.mathworks.com/help/physmod/elec/ref/solarcell.html?requestedDomain=www.mathworks.com>
7. Parfenov A. A., Maronchuk I.I., Shirokov I.B. Features of the design and operation of low-power solar power plants in the conditions of the Crimea. *Sbornik trudov rossiyskoy konferentsii «Fiziko-himicheskie problemyi vozobnovlyaemoy energetiki»* - SPb.: Ioffe Institute. AF Joffe, 2015, pp. 244 - 245.
8. Parfenov A.A. Simulation of solar photovoltaic panels using MATLAB/Simscape /*Sbornik materialov tretego Mezhdunarodnogo foruma "Vozobnovlyаемая энергетика: Puti povysheniya energeticheskoy i ekonomicheskoy effektivnosti"* Respublike Kryim, Yalta. REENFOR-2015, Yalta, 2015, pp. 171-176.
9. Breakers L.V. Technical Application Papers No. 10. Photovoltaic plants. (ABB SACE), 2010, 107 p.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 699.874

Разработка биопротектора на основе культуры тионовых бактерий рода *Thiobacillus*

В.М. Гавриш¹, Г.А. Баранов², П.В. Матюхина³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹5brachman5@gmail.com, ³trezvyy.vzglyad@mail.ru.

Статья поступила 24.05.2016 г.; после доработки 26.05.2016 г.

Аннотация

Рассматривается возможность создания биопротектора, препятствующего деградации строительных и промышленных материалов микроскопическими грибами, с применением биотехнологии, использующей бактериальную культуру тионовых бактерий рода *Thiobacillus*. В ходе работы автор провел оценку степени воздействия железнокислых бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* на различные грибы; провел испытания по определению воздействия предлагаемой суспензии на рост и развитие плесневых грибов, наиболее агрессивных бактериальных культур; создал биозащитный колер для побелки и провел его испытание.

Ключевые слова: биотехнологии, биокоррозия, биопротектор, плесневые грибы, бактериальная культура.

Development Bioprotectors Based Culture Thiobacteria Kind *Thiobacillus*

V.M. Gavrish¹, G.A. Baranov², P.V. Matyuhina³Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹5brachman5@gmail.com, ³trezvyy.vzglyad@mail.ru.

Received 24.05.2016 y.; received in final form 26.05.2016 y.

Abstract

The possibility of creating bioprotectors preventing the destruction of building and industrial materials with microscopic mushrooms, of application of biotechnology, which uses bacterial culture thiobacteria kind *Thiobacillus*. During the work the author has evaluated the impact of iron-oxidizing bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* at different fungi; He conducted tests to determine the impact of the proposed suspension of the growth and development of molds, the most aggressive bacterial cultures; Bioprotective created color to whitewash and has spent his test.

Keywords: biotechnology, biocorrosion, bioprotectors, fungi, bacterial culture.

Введение

Сегодня во всем мире на долю биокоррозии приходится около 28 % всех разрушений строительных и промышленных материалов [1].

Подавляющее большинство этих материалов способно подвергаться процессу биоповреждения. На материалах и изделиях складываются более или менее постоянные сообщества мик-

роорганизмов, представляющие собой ценозы косвенно антропогенного характера.

Процессы биокоррозии протекают особенно интенсивно при наличии влаги и питательных веществ, которые обычно в достатке содержатся в окружающей среде. Бетон и железобетон в современном строительстве являются одними из наиболее часто применяемых строительных материалов.

Широкое их использование объясняется объективными факторами, главными из которых являются:

- уникальность физических и механических свойств;
- практически неисчерпаемые запасы природного сырья для их производства;
- потенциальная возможность замены его техногенными отходами различных отраслей промышленности;
- сравнительно низкая энергоемкость исходных материалов и технологических процессов;
- высокие эколого-экономические показатели производства по сравнению с другими взаимозаменяемыми материалами [2].

Однако, наряду с вышеназванными преимуществами, у данных материалов имеются некоторые очевидные недостатки – гигроскопичность, малая кислотоустойчивость и другие, которые способствуют заселению их микроорганизмами и дальнейшему биоразрушению [3].

При этом микробиологическая коррозия может идти следующими путями: непосредственным воздействием продуктов метаболизма микроорганизмов на исследуемый объект; образованием органических продуктов, которые могут действовать как деполаризаторы или катализаторы коррозионных реакций. При этом коррозионные реакции становятся отдельной частью метаболического цикла бактерий [4].

Биологическая коррозия строительных материалов интенсивно развивается в условиях техногенных сред, которыми, в первую очередь, являются промышленные предприятия, особенно химической, пищевой и медицинской промышленности, канализационные коллекторы и сооружения для отведения сточных вод, а также территории производственной и придорожной застройки в условиях современных городов. Наличие богатой питательной среды в цехах указанных производств, высокая влажность и затрудненный воздухообмен, а также различные поллютанты в городской среде – все это создает благоприятные условия для интенсивного развития биодеструкторов. Основными агентами биоповреждений являются микроскопические грибы.

В качестве химических средств защиты материалов от биоповреждений, вызываемых микроскопическими грибами, в последнее время используются следующие фунгициды:

- органические антисептики, среди которых хорошо известны четвертичные аммониевые соединения;

- органические соединения, содержащие в своем составе атомы тяжелых металлов, таких как ртуть, свинец, серебро и др.;
- химические вещества, наиболее используемые в быту (Belinka, Баги Анти-Плесень, Део-антиплесень, Сепотосан-Т, Сагротан, Мегель-фри, Mogel-Fri, NEOMID) [5].

Стоимость профессионального удаления плесени выходит за рамки скромного бюджета, а некоторые домовладельцы вынуждены платить свыше 10000 рублей за профессиональное обслуживание [6]. Таким образом, стоимость продуктов для удаления плесени остается разумной альтернативой профессиональным услугам по борьбе с грибом. Такого рода продукты применяются для временного контроля плесени. Долгосрочная стратегия заключается в выявлении причин образования плесени и их устранении.

Однако в силу своей высокой токсичности и стоимости, данные вещества крайне опасны не только для микроскопических грибов, но и для организма человека, в связи с чем, в последние годы активно ведется поиск альтернативных способов борьбы с биоповреждениями. Одним из таких способов является использование нетоксичных, безвредных для животных и людей биопротекторов, получаемых с использованием современных биотехнологий и препятствующих деструкции промышленных и строительных материалов.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью научного исследования является обоснование возможности создания биопротекторов, препятствующих деструкции строительных и промышленных материалов микроскопическими грибами, с применением биотехнологии, использующей бактериальную культуру типовых бактерий рода *Thiobacillus*.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести предварительную оценку степени воздействия железнокислых бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* на различные грибы;
- провести испытания по определению воздействия предлагаемой суспензии на рост и развитие плесневых грибов, наиболее агрессивных бактериальных культур;
- создать биозащитный колер для побелки и испытать его.

Предварительная оценка степени воздействия железнокислых бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* на различные грибки

В ходе исследований, направленных на создание биотехнологий, предусматривающих использование микроорганизмов-биоокислителей, для выщелачивания ценных металлов из руд, концентратов и лома, было замечено фунгицидное воздействие железнокислых бактерий вида *Thiobacillus ferrooxidans* и продуктов их жизнедеятельности на поверхность материала, имеющего следы естественного поражения грибом вида *Aspergillus niger*, образующего плесневый налет серовато черного цвета.

Культура грибка *Aspergillus niger* (рис. 1) растет при pH от 3,0 до 8,0 и температуре до 500 °C и длительно сохраняется при замораживании и высушивании.



Рис. 1. Конидиеносцы *Aspergillus niger*

Аспергиллы широко распространены во внешней среде. Им принадлежит ведущая роль в порче зерна и сена, их часто обнаруживают в воздухе, в системе кондиционирования.

Благоприятной средой для развития грибницы являются сырые поверхности помещений. Развитие аспергиллов в значительной степени зависит от субстрата, на котором они развиваются [7].

Для предварительной оценки степени воздействия железнокислых бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* на грибок использовались продукты жизнедеятельности бактерий – суспензия желтого цвета железноокисного пигмента (СЖЖП), оседавшая на дне биореактора с раствором сернокислого трехвалентного железа, при исследованиях по выщелачиванию ценных металлов с помощью микроорганизмов-биоокислителей.

Извлеченная из биореактора суспензия разводилась с дистиллированной водой до консистенции, позволяющей использовать ее в пнев-

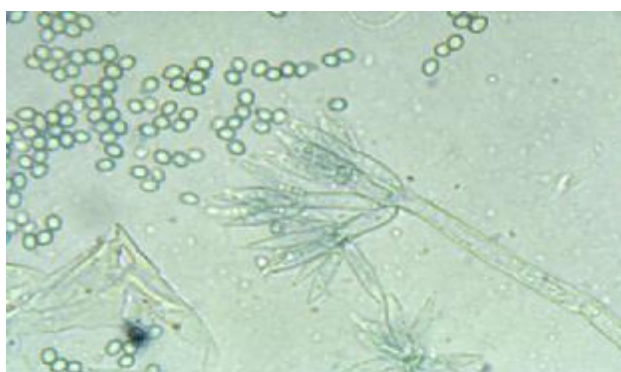
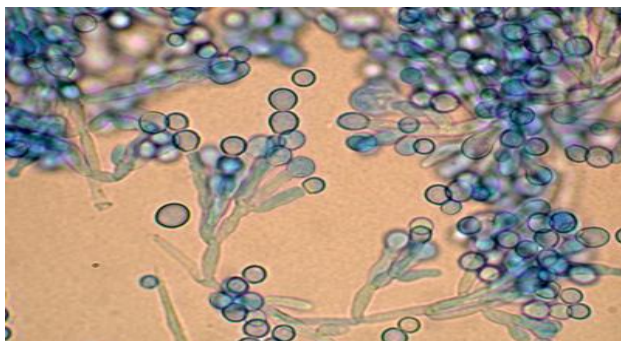
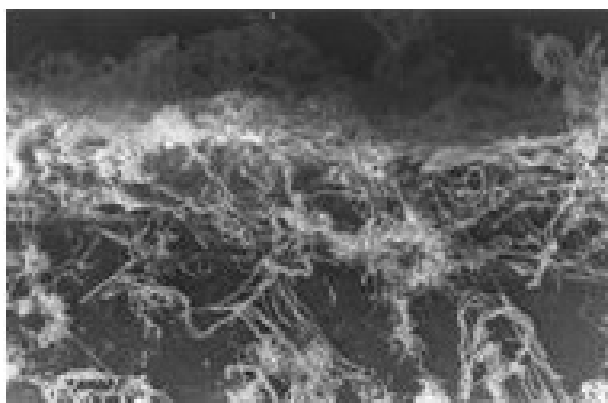
матическом распылителе, и равномерным слоем наносилась на бетонную поверхность, имеющую характерные следы поражения грибом типа *Aspergillus niger*.

Всего было обработано 8 пораженных участков поверхности общей площадью 1,6 м². В результате 24 часовой экспозиции на всех 8 участках было отмечено шелушение и отслаивание верхнего слоя плесени от поверхности. Очищенная поверхность практически восстановила естественный окрас. Наблюдения за очищенными участками в течение последующей недели показали отсутствие повторных следов плесени. Был сделан предварительный вывод о потенциальной возможности использования суспензии железнокислых бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* для создания защитных покрытий, обладающих фунгицидными свойствами.

Испытания по определению воздействия суспензии на рост и развитие плесневых грибов, наиболее агрессивных бактериальных культур

Дальнейшие испытания по определению воздействия данной суспензии на рост и развитие плесневых грибов, наиболее агрессивных бактериальных культур, способствующих разрушению строительных конструкций и поверхностей из бетона, проводились уже в лаборатории грибостойкости технических изделий и материалов института микробиологии и вирусологии Национальной Академии Наук Украины. Результаты микробиологического исследования разрушенных участков бетона позволили выявить наличие на их поверхности представителей тионовых и нитрифицирующих бактерий, зеленых водорослей, микроскопических грибов. Испытания проводились в рамках научно-исследовательской работы по теме «Определение воздействия на микроскопические грибы культурные жидкостей *Thiobacillus ferrooxidans*» Согласно требованиям ГОСТ 9. 048-89 для проведения испытаний были взяты культуры микроскопических грибов:

- *Aspergillus niger* van Tieghem.
- *Aspergillus terreus* Thom. (рис. 2)
- *Aureobasidium pullulans* (de Bary) Amaud.
- *Penicillium funiculosum* Thom. (рис. 3)
- *Penicillium ochrochloron* Biourge.
- *Scopulariopsis brevicaulis* Bainier. (рис. 4)
- *Trichoderma viride* Pers ex Fr.
- *Paecilomyces variotii* Bainier. (рис. 5)

Рис. 2. *Aspergillus terreus* ThomРис. 3. *Penicillium funiculosum* ThomРис. 4. *Scopulariopsis brevicaulis* Bainier.Рис. 5 *Penicillium ochrochloron* Biourge

В ходе испытаний было установлено, что суспензия подавляла рост культур микромицетов в разведениях от 100 % до 1:10000, в разной степени, в зависимости от концентрации.

Наиболее устойчивыми к воздействию суспензии оказались культуры: *Aspergillus niger* van Tieghem, *Penicillium funiculosum* Thom, *Trichoderma viride* Pers ex Fr.

С этими культурами были проведены дополнительные испытания методом лунок с СЖЖП на сплошном газоне культуры и методом блоков с культурами грибов на средах с добавлением СЖЖП. В ходе испытаний было установлено, что суспензия может оказывать фунгицидное и фунгистатическое воздействие на наиболее устойчивые культуры микроскопических грибов. Механизм воздействия, очевидно, заключается в ингибировании биосинтеза основных компонентов клеточной стенки гриба и изменении липидного состава мембраны грибов. По результатам испытаний, проведенных в рамках научно-исследовательской работы, было сделано заключение о том, что исследуемая суспензия аэробной железобактерии *Thiobacillus ferrooxidans*, полученная по биохимической технологии, является грибостойкой и способна подавлять развитие наиболее агрессивных культур микромицетов [8].

Создание биозащитного колера для побелки и его испытания

С использованием предлагаемой суспензии был создан биозащитный колер для побелки, представляющий собой нетоксичного пасту желтого цвета, безвредную для животных и людей, не имеющую медицинских противопоказаний при применении. Разработанный продукт показал отличные результаты при обработке внутренних помещений с повышенной влажностью и недостаточным воздухообменом (овощехранилища, фруктохранилища, подвалы, склады и т.п.), так и при обработке фасадов зданий и строений в прибрежной зоне сырого климата.

Четырехлетние испытания защитной краски несколькими строительными компаниями при фасадной отделке строений в прибрежной зоне показали:

- высокую стойкость к атмосферным осадкам;
- светостойкость (колер фасадов за 4 года практически не изменился);
- высокую адгезию к оштукатуренным поверхностям;

- отсутствие образования плесени или грибка, вызывающих потемнения или шелушения покрытия в местах с высокой влажностью (район карнизов, водостоков и т.п.);
- высокую технологичность нанесения на поверхность при помощи распылителей различных типов;

Заключение

Полученная суспензия аэробной железобактерии *Thiobacillus ferrooxidans* способна оказывать фунгицидное и фунгистатическое действие на наиболее устойчивые культуры микроскопических грибов и является эффективным биопротектором, препятствующим деградации строительных и промышленных материалов. Востребованность созданного на ее основе коммерческого продукта на строительном рынке и многочисленные положительные отзывы со стороны заказчиков, позволяют говорить о целесообразности дальнейших исследований в направлении создания нетоксичных биопротекторов на основе современных биотехнологий.

Дальнейший интерес представляют исследования возможности применения предлагаемого биопротектора для создания защитных покрытий, препятствующих развитию процессов хемо- и биокоррозии сооружений и изделий, имеющих непосредственный контакт с агрессивной средой, в том числе контейнеров для хранения твердых токсичных отходов сельского хозяйства и промышленности.

Список литературы

1. Аналитический портал химической промышленности [Электронный ресурс] – Электрон. текстовые, графические данные (36 КБ). М., 2016 Режим доступа: http://newchemistry.ru/printletter.php?n_id=5342
2. Василенко М.И. Микробиологические особенности процесса повреждения бетонных поверхностей / М.И. Василенко, Е.Н. Гончарова // Фундаментальные исследования, 2013. – Вып. 4. – С. 886 – 891.
3. Ферронская А.В. Долговечность конструкций из бетона и железобетона: учеб. пособие / А.В. Ферронская. – М.: Изд-во АСТ, 2001. – 335 с.
4. Андреюк Е.И. Микробная коррозия и ее возбудители / Е.И. Андреюк, В.И. Билай, З.Э.Коваль, И.А. Козлова. – Киев: Наук. думка, 1980. – 288 с.
5. Щербатюк Т.Г. Влияние озонированной дистиллированной воды на жизнедеятельность микроскопических плесневых грибов / Т.Г. Щербатюк, Д.В. Кряжев, В.Ф.Смирнов, Е.С. Клинцева // Вестник физиотерапии и курортологии, 2008. – Т. 13, № 5. – С. 14 – 15.
6. Служба санитарной оценки объектов [Электронный ресурс] – Электрон. текстовые, графические данные (56 КБ). М., 2016 Режим доступа: <http://fccoo.ru/services-to-individuals/unichtozhenie-mikrobov/unichtozhenie-pleseni/>
7. Гемотест. Медицинская лаборатория [Электронный ресурс] – Электрон. текстовые, графические данные (16,38 КБ). М., 2014 Режим доступа: https://www.gemotest.ru/analysis/catalog/aspergillusniger_igg_immulite/
8. ГОСТ 9.048-89 "Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов". – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 23 с.

References

1. Analiticheskij portal himicheskoi promyshlennosti [Analytical chemical industry portal] – Available at: http://newchemistry.ru/printletter.php?n_id=5342 (accessed 20.04.2016)
2. Vasilenko M.I., Goncharova E.N. Microbiological features of the process of damage concrete surfaces. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013, No 4, pp. 886 – 891.
3. Ferronskaya A.V. *Dolgovechnost konstrukcij iz betona i zhelezobetona: uchebnoe posobie* [The durability of structures made of concrete and reinforced concrete: a tutorial]. Moscow, AST Publ., 2001, 335 p.
4. Andreyuk E.I., Bilaj V.I., Koval Z.E., Kozlova I.A. *Mikrobnaya korrozija i ee vzbuditeli* [Microbial corrosion and its pathogens]. – Kiev: science, 1980. – 288 p.
5. Scherbatyuk T.G., Kryazhev D.V., Smirnov V.F., Klintsova E.S Effect of ozonated distilled water on the life of microscopic fungi. *Vestnik fizioterapii i kurortologii*, 2008, No 13, № 5, pp. 14 – 15
6. Sluzhba sanitarnoj ocenki obektov [Service health assessment facilities] – Available at: <http://fccoo.ru/services-to-individuals/unichtozhenie-mikrobov/unichtozhenie-pleseni/> (accessed 29.04.2016)
7. Gemotest. Medicinskaya laboratoriya [Hemotest. Medical laboratory] – Available at: https://www.gemotest.ru/analysis/catalog/aspergillusniger_igg_immulite/ (accessed 4.05.2016)
8. GOST 9.048-89. Edinaya sistema zaschity ot korozii i starenija. Izdeliya tehicheskie. Metody laboratornyh ispytanij na stojkost k vozdejstviju plesnevyyh gribov. Moskow. Standartinform Publ., 1989. 10 p. (In Russian)

УДК 504.3.054(470)

Техногенное аэрозагрязнение прибрежной урбанизированной территории г. Севастополя

Ю.Ю. Климова¹, М.А. Косовская²

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹ zama@mail15.com, ² [masha.korneva <sevtania@rambler.ru>](mailto:masha.korneva@sevtania@rambler.ru)

Статья поступила 16.05.2016 г. после доработки 18.05.2016 г.

Аннотация

Рассмотрена проблема техногенного аэрозагрязнения прибрежной урбанизированной территории Севастополя. Проанализированы статистические данные Территориального органа Федеральной службы государственной статистики России по городу Севастополю (Севастопольстат) по загрязнению атмосферного воздуха Севастополя. Дана характеристика воздействия аэрозагрязнения на реципиентов. Выполнена общая оценка загрязнения атмосферного воздуха. Определены основные источники аэротехногенных эмиссий и приоритетные загрязняющие вещества для оптимизации системы регионального мониторинга в городе и последующего осуществления научно обоснованных природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: техногенное аэрозагрязнение, урбанизированная территория, аэрополлютанты, рассеивание примесей, структура заболеваемости, автотранспорт, топливно-энергетический комплекс, индекс загрязнения атмосферы, биоиндикация.

Technogenic Aero Pollution of Coastal Urbanized Territories of Sevastopol

Yu.Yu. Klimova¹, M.A. Kosovskaya²

Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹ zama@mail15.com, ² [masha.korneva <sevtania@rambler.ru>](mailto:masha.korneva@sevtania@rambler.ru)

Received .16.05.2016 y.; received in final form .18.05.2016 y.

Abstract

The problem of technogenic aero pollution of the coastal urbanized territory of Sevastopol is considered. Statistical data of Territorial authority of Federal service of the state statistics of Russia around the city to Sevastopol (Sevastopolstat) on pollution of atmospheric air of Sevastopol are analysed. The characteristic of impact of aero pollution on recipients is given. The general assessment of pollution of atmospheric air is executed. The main sources of aero technogenic issues and the priority polluting substances for optimization of system of regional monitoring in the city and the subsequent implementation of evidence-based nature protection actions are defined.

Keywords: technogenic aero pollution, the urbanized territory, aeropollutant, a dispelling of impurity, structure of incidence, motor transport, fuel and energy complex, an index of pollution of the atmosphere, bioindication.

Введение

Урбанизированная территория Севастополя является типичным примером урбанистической разновидности прибрежной зоны, подвергающейся аэротехногенному воздействию.

Город Севастополь (44°37' с.ш., 33°30' в.д.),

который можно назвать городом-регионом, учитывая прилегающие к нему территории - Инкерман, поселок городского типа Кача, 29 сельских населенных пунктов, в рамках административного района занимают юго-западную часть Крымского полуострова, с запада и юга омывается водами Черного моря.

Общая площадь Севастопольского региона 107,96 тыс. га, из них 21,6 тыс. га - акватория бухт и 86,4 тыс. га - суша.

Административно город Севастополь разделен на четыре района: Ленинский, Гагаринский, Нахимовский и Балаклавский. При этом каждый из районов, имеет свои особенности, влияющие на экологическое состояние атмосферного воздуха – это тип застройки, орография, микроклиматические условия (количество осадков, температурная стратификация, скорость ветра, перемешивание воздуха с высотой, солнечная радиация), которые имеют определяющее значение в скорости очищения приземного слоя воздуха для приморских городов.

В большей степени, техногенное аэрозагрязнение сказывается на здоровье городского населения. Здоровье населения является основным критерием качества атмосферного воздуха, также, в основе требований Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) к стандартам качества воздуха лежит охрана здоровья человека.

Проблемой исследования и прогнозирования экологического состояния атмосферного воздуха урбанизированных территорий, рассеивания примесей в приземном слое воздуха на территории Российской Федерации занимались ученые: М.Е. Берлянд, Э.Ю. Безуглая, В.Н. Денисов, А.С. Монин, М.Т. Дмитриев [1-5] и др., за рубежом – F. Pasquill, C.X.B. Пристли, M. Beniston [6-8].

Медико-географические аспекты урбанизированных территорий и их экологической эпидемиологии представлены в работах Б.Б. Прохорова, Б.А. Ревича [9,10] и др.

Основные экологические проблемы Крыма и экологически зависимые изменения здоровья населения рассмотрены С.Э.Шибановым [11]. Частная оценка экологического состояния атмосферного воздуха Севастополя при воздействии техногенных факторов дана в работах Ю.В. Корчмита [12] и др.

В течение многих лет для Крымского полуострова и Севастополя, в том числе, является характерным высокий уровень заболеваемости и распространенности болезней органов дыхания и злокачественных новообразований.

В связи с ухудшением экологической ситуации в Севастополе, высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха от стационарных и передвижных источников загрязнения Постановлением Правительства Севастополя от 26.06.2015 г. № 553-ПП утверждена государственная программа «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресур-

сов города федерального значения Севастополя на 2015 - 2017 годы».

Основной целью программы является обеспечение экологической безопасности, сохранение экосистем и воспроизводство природных ресурсов. Одним из приоритетных направлений программы, является организация территориальной системы экологического мониторинга атмосферного воздуха, в городе Севастополе, для получения оперативных и достоверных данных о состоянии окружающей природной среды.

Реализация региональной программы позволит разработать природоохранные мероприятия, с целью уменьшения техногенного аэрозагрязнения города, а также своевременного информирования населения об изменении качества атмосферного воздуха, что будет являться условием экологической и социальной безопасности города.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данного исследования является анализ техногенного аэрозагрязнения урбанизированной территории Севастополя за период 2010-2015 гг.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- § проанализировать статистические данные Территориального органа Федеральной службы государственной статистики России по городу Севастополю (Севастопольстат) по загрязнению атмосферного воздуха Севастополя;
- § дать характеристику воздействия аэрозагрязнения на реципиентов;
- § выполнить общую оценку загрязнения атмосферного воздуха, определить основные источники аэротехногенных эмиссий и приоритетные загрязняющие вещества для оптимизации системы регионального мониторинга в городе и последующего осуществления научно обоснованных природоохранных мероприятий.

Характеристика воздействия аэрозагрязнения Севастополя на реципиентов

Материалом для исследования послужили отчеты Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по городу Севастополю за период 2010-2015 гг., а также Материалы к докладу о состоянии и охране окружающей среды города федерального значения

Севастополя (Главного управления природных ресурсов и экологии города Севастополя) за 2015 г.

По данным Росстата по состоянию на 1 января 2016 года численность населения г. Севастополя (как субъекта РФ) составила 416 263 человек (постоянных жителей), в том числе городское население - 385 777 человек (92,68 %) и сельское – 30 486 человек (7,32 %). В 2014 году 344853 жителя. Наблюдается интенсивный прирост населения из-за высокого миграционного притока населения из других регионов России и Украины, также численность населения увеличивается в несколько раз в летний рекреационный сезон.

В работе [13] отмечается постоянный рост количества случаев болезней органов дыхания среди детского населения, что, возможно, связано с экологической напряженностью в регионе.

Показано, что на протяжении 2000-2013 гг., несмотря на снижение значений абсолютных и относительных показателей, болезни органов дыхания продолжали оставаться на первом месте по заболеваемости и на втором по распространенности в структуре всей патологии, зарегистрированной у населения Крыма. Среди взрослого населения лидирующие позиции по распространенности занимали хронические бронхиты, другие хронические обструктивные легочные болезни, острые ларингиты и трахеиты. А среди детей первые позиции принадлежали острым фарингиту и тонзиллиту, хроническим болезням миндалин и аденоидов, острым ларингиту и трахеиту.

Кроме того, в последнее время отмечается резкое увеличение количества аллергических заболеваний и рост аллергенов не чувствительных к современным антигистаминным средствам.

В исследованиях, посвященных влиянию загрязнения воздуха автотранспортом на показатели развития детей, указано, что наличие аэротехногенного загрязнения повышает вероятность формирования астенического типа телосложения ребенка, снижает скорость роста и развития организма, ухудшает функциональное состояние кардиореспираторной и прочих систем. Утверждается, что при наличии загрязнений в атмосферном воздухе снижается скорость физического развития дошкольников, подростков и замедляется их биологическое созревание, сроки созревания костей. Полагают, что загрязнители, в том числе свинец, содержащийся в выхлопных газах автотранспорта, оказывает негативное действие на здоровье детей первых шести лет жизни, что снижает устойчивость нервной, эндокринной и дыхательной систем к действию различных повреждающих факторов [14].

В Севастополе онкологическая ситуация

более острая, чем в среднем в Российской Федерации, и каждый пятый онкологический больной в Севастополе страдает раком легких - наиболее распространенной формой рака в мире. Так, по данным статистики за 2013 год, максимальные показатели смертности зафиксированы в г. Севастополе: 513,0 случаев на 100 тыс. населения. Для сравнения, число умерших от онкологии в среднем по России в 2014 году на 100 тысяч населения составило 198,6. Средний показатель для стран ОЭСР (Organisation for Economic Cooperation and Development) в 2011 году - 211 на 100 тысяч человек (в Польше – 239, в Венгрии – 291, в Финляндии – 174).

В общей структуре заболеваемости злокачественными новообразованиями самыми частыми локализациями (в порядке убывания) являются трахея, бронхи, легкое.

Несомненно, что проблема техногенного аэрозагрязнения урбанизированной территории Севастополя актуальна не только для его жителей, но и для флоры и фауны, которая включает в себя, как и на всем Крымском полуострове, значительное количество охраняемых видов, которые создают небольшие популяции.

Отмечается, что промышленное загрязнение, интенсивное развитие транспорта в крупных городах приводят к значительному загрязнению окружающей среды поллютантами, влияющими, как на здоровье человека, так и на древесные насаждения. Основная нагрузка по обезвреживанию вредного воздействия загрязняющих веществ ложится именно на зеленые насаждения мегаполисов. К сожалению, не всегда растения успешно справляются с этой задачей. Большая концентрация в атмосфере различных соединений углерода, серы, азота, тяжелых металлов, фенолов и т.д. негативным образом сказывается на состоянии «зеленого фильтра» городов, сокращая сроки жизни и ослабляя защитные системы растений [15].

Так, при определении экологического состояния деревьев по центральному кольцу города, нами были выявлены резко выраженные признаки фауности, отягощенные антропогенным воздействием. Наиболее часты случаи фауны у клена платановидного (*Acer platanoides*), ореха грецкого (*Juglans regia*), каштана конского обыкновенного (*Aesculus hippocastanum*). Исходя из существующих нормативных документов, экологическое состояние деревьев в целом характеризуется как ослабленное. В таблице 1 представлены результаты рекогносцировочного обследования древостоя.

Таблица 1. Результаты таксационного исследования

Вид древесного насаждения	Общее количество деревьев	Здоровые	%	Больные	%
Шелковица (<i>Morus bombycis</i>)	15	14	92,8	1	7,2
Софора японская (<i>Styphnolobium japonicum</i>)	79	79	100	-	-
Клен платановидный (<i>Acer platanoides</i>)	148	54	36,4	94	63,6
Ель (<i>Picea</i>)	17	17	100	-	-
Орех грецкий (<i>Juglans regia</i>)	174	91	52,3	83	47,7
Каштан конский обыкновенный (<i>Aesculus hippocastanum</i>)	117	12	10,3	105	89,7
Туя западная (<i>Thuja occidentalis</i>)	1	1	100	-	-
Тополь пирамидальный (<i>Populus pyramidalis</i>)	11	6	54,5	5	45,5
Гледичия трехколючковая (<i>Gleditsia triacanthos</i>)	20	17	85,0	3	15,0
Платан (<i>Platanus orientalis</i>)	15	14	93,3	1	6,7
Липа мелколистная (<i>Tilia cordata</i>)	85	67	78,8	18	21,2
Робиния лжеакация (<i>Robinia pseudoacacia</i>)	26	20	76,9	6	23,1
Вяз шершавый (<i>Ulmus glabra</i>)	74	67	90,5	7	9,5
Катапальпа (<i>Catalpa</i>)	26	22	84,6	4	15,4
Кедр ливанский	6	6	100	-	-

Немаловажно, что 8 декабря 2015 года Законодательное собрание приняло Закон «Об особо охраняемых природных территориях в городе Севастополе». В перечень особо охраняемых природных территорий регионального значения города вошли 12 объектов. Это государственные ландшафтные заказники «Мыс Фиолент», «Мыс Айя», «Байдарский», государственный общезоологический заказник «Бухта Казачья», ботанический памятник природы «Ушакова Балка», гидрологические памятники природы «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Лукулл», «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Сарыч», «Прибрежный аквальный комплекс у мыса Фиолент», «Прибрежный аквальный комплекс у Херсонеса Таврического», а также, комплексный памятник природы «Мыс Фиолент», памятник природы - заповедное урочище «Скалы Ласпи» и природный ландшафтный парк «Максимова дача».

Так, например, 54 вида растений и 41 вид животных Байдарского заказника занесены в Красную книгу.

В тоже время, несмотря на вносимое загрязнение, для атмосферного воздуха Севастопольского рекреационного региона характерно высокое содержание в воздухе гидроаэроионов, озона и морских солей, фитонцидов курортной флоры (можжевельника, сосны), что оказывает десенсибилизирующее, противовоспалительное и анти-

септическое действие и используется при терапевтическом лечении хронических заболеваний органов дыхания.

Учитывая вышеизложенное можно утверждать, что загрязнение Севастополя коррелирует с заболеваемостью и смертностью населения.

Общая оценка загрязнения атмосферного воздуха г. Севастополя

Исследование загрязнения воздушного бассейна имеет большое значение для нормирования антропогенной нагрузки и разработки природоохранных мероприятий с целью его стабильного уменьшения. Поэтому в настоящее время как никогда актуальны вопросы отслеживания, контроля и прогноза загрязнения атмосферного воздуха.

Так, например Ленинский район г. Севастополя, где проживает 112,220 тыс. человек (100 % - городского населения) занимает центральную часть города и проспект Генерала Острякова.

Территориально это самый небольшой район города, его площадь составляет 26 км², характеризуется большей загрязненностью, по сравнению с периферийными районами города, особым температурным режимом приземного слоя воздуха, обусловленным интенсивным движением автотранспорта. Следует отметить,

что крупные промышленные предприятия - источники эмиссий в атмосферу в районе отсутствуют. Основными же источниками техногенных эмиссий и теплового излучения здесь является автомобильный транспорт на городском кольце города, котельные малой мощности 2...3 МВт, а также искусственные покрытия улиц, стены и крыши зданий, отражающие инфракрасное излучение.

В связи с рельефом техногенно - освоенной местности и планировочными особенностями городской застройки Ленинского района, наблюдается нивелирование ветров и усиление турбулентности воздушных потоков, что приводит к ослаблению вентилируемости центральной части города, снижению скорости ветра менее 5 м/с, скоплению устойчивых и тонкодисперсных летучих аэрозолей (As, Sb, Cd и Pb, Hg и др.) в приземном слое воздуха, возникновению инверсионного слоя теплого воздуха высотой около 200 м, который затрудняет горизонтальное перемещение приземного слоя воздуха и препятствует рассеиванию аэротоксикантов в атмосфере.

В этом аспекте важно отметить, что Ленинский район плотно заселен, здесь находится много офисов, банков и административных учреждений, 33 детских сада, 14 школ, 1 школа-интернат, 1 спортивная школа, 3 стадиона, 17 поликлиник и больниц. Также, в районе находятся зоны отдыха, посещаемые как местными жителями, так и рекреантами – бульвары, парки, в том числе Детский, 20 скверов, пляжи.

Программа «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов города федерального значения Севастополя на 2015 - 2017 годы» предполагает развитие системы регионального экологического мониторинга.

Экологический мониторинг – это многоцелевая система, включающая повторяющиеся наблюдения, оценку и прогноз антропогенных изменений состояния экосистем.

Термин «мониторинг» появился перед проведением Стокгольмской конференции ООН по окружающей среде (Стокгольм, 5-16 июня 1972 г.). Первые предложения по поводу такой системы были разработаны экспертами специальной комиссии Научного комитета по охране окружающей среды в 1971 году. Первое межправительственное совещание по мониторингу, было созвано в Найроби (Кения, февраль 1974 г.), где были изложены основные положения и цели программы глобальной системы мониторинга окружающей среды, определен список приоритетных загрязнителей для их учета при организации мониторинга, а

также было решено установить контроль за параметрами, необходимыми для интерпретации результатов измерения загрязнений.

Следует отметить, что система мониторинга антропогенных изменений природной среды, в данном случае атмосферного воздуха, входит составной частью в развитую в России и во многих странах мира, систему наблюдений и контроля состояния природной среды.

В Севастополе мониторинг состояния атмосферного воздуха осуществляется на двух стационарных действующих постах наблюдения. Постом № 1 (г. Севастополь, Павловский мыс) метеостанция, обслуживается Региональным центром по гидрометеорологии в Республике Крым и постом № 2 (г. Севастополь, ул. Коммунистическая, 10), который эксплуатируется филиалом ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Крым и городе федерального значения Севастополе» в городе федерального значения Севастополе.

Техническое оснащение и нахождение данных постов наблюдения на балансе у различных государственных учреждений не позволяет проводить качественный и количественный анализ содержания вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, получать полную оперативную комплексную гидрометеорологическую информацию, и, следовательно, планировать и проводить мероприятия по снижению выбросов вредных веществ в атмосферу.

Вышеуказанное подтверждается, тем, что, по данным наблюдений за загрязнением атмосферного воздуха Крымского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды в апреле 2016 года в г. Севастополе уровень загрязнения атмосферы определялся как низкий и за первый квартал 2016 года загрязнения атмосферного воздуха в городе не наблюдалось. Также, например, по данным Поста № 1 (данные за период с сентября по декабрь 2014 г.), показатели наблюдаемых загрязняющих веществ атмосферного воздуха города Севастополя: сернистого ангидрида, диоксида азота, оксида углерода, пыли, формальдегида, находятся в пределах нормы.

Исключение составляют лишь формальдегиды, по которым наблюдается превышение показателя среднесуточной ПДК. Данные показатели по приоритетным аэротоксикантам не могут, на наш взгляд, в полной мере отражать реальное экологическое состояние атмосферного воздуха в городе.

Выполнение оценки состояния атмосферы при аэротехногенном воздействии автотранс-

порта г. Севастополя невозможно, ввиду отсутствия статистических данных по выбросам за 2010-2015 гг.

Основные источники аэротехногенных эмиссий и приоритетные загрязняющие вещества, тенденции изменений уровня загрязнения атмосферы

Нами определены главные источники аэротехногенных эмиссий – автомобильный автотранспорт и централизованные и децентрализованные предприятия топливно-энергетического комплекса (ТЭК) города.

В работе [16] отмечается, что автомобильный транспорт вносит наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха г. Севастополя и доминирующим загрязнителем атмосферы, наиболее опасным (учитывая его объемы) является оксид углерода. Здесь же показано, что в районе пл. Суворова при скорости ветра не равной нулю – максимальная величина кратности превышения ПДК_{м.р.} оксида углерода у края дороги составляет 0,9 и далее с увеличением расстояния от края падает до 0,36 (т.е. превышения не наблюдается). При скорости ветра равной нулю – кратность превышения ПДК_{м.р.} оксида углерода у края дороги составляет 13,4 и далее по ширине тротуара с увеличением расстояния от края дороги падает до 5,3, т.е. может наблюдаться многократное превышение ПДК. Действительно, за последние годы в г. Севастополе заметно вырос автотранспортный поток. По данным ГИБДД, в 2000 году парк зарегистрированных в городе автомобилей, составлял 18 тыс. единиц, а уже на 31 декабря 2014 года в городе насчитывается 112 тыс. единиц автотранспорта.

Вхождение г. Севастополя в состав Российской Федерации, и связанные с этим особенности переходного периода, наиболее значительно отразились на результатах работы транспортной отрасли. Анализируя объемы транспортных перевозок, можно сказать, что в городе Севастополе отмечается рост объемов перевозки грузов и пассажиров. Такая динамика связана с ростом товарооборота и развитием рекреационной деятельности в городе за последние годы. Большой вклад в общий объем выбросов вносят транзитные транспортные потоки, особенно в весенний и летний период, что значительно увеличивает выбросы в атмосферу.

К числу приоритетных загрязнителей атмосферы, поступающих в городскую атмосферу с отработавшими газами автомобилей, относятся свинец, бенз(а)пирен, один из сильнейших кан-

церогенов и летучие углеводороды.

Автомобильный транспорт загрязняет атмосферный воздух не только токсичными компонентами отработанных газов, парами топлива, но и продуктами износа шин, которые и представляют на наш взгляд главную экологическую опасность.

Так, исследования американских аллергологов и онкологов, обративших внимание на повышенную чувствительность к аллергическим и онкологическим заболеваниям жителей домов, расположенных вблизи автострад в городах, позволили предположить, что при естественном износе автомобильных шин в воздушную среду попадает значительное количество аэрозоля. Тщательно изучив его дисперсный состав при анализе состава воздуха на шоссе с умеренным движением автотранспорта, исследователи обнаружили присутствие от 3800 до 6900 фрагментов шин в каждом кубическом метре воздуха, более 58 % из них оказались размером менее 10 микрон и, следовательно, способны легко проникать в лёгкие человека. При этом фрагменты шин вызывают аллергические реакции, бронхиальную астму, онкологические заболевания разной этиологии и патогенеза, а при контакте со слизистой оболочкой и кожным покровом - конъюнктивит и ринит. Из каждой шины автомобиля при его эксплуатации, в результате износа в течение года, в окружающую среду выбрасывается в среднем 1,14 кг шинной пыли и мелкодисперсного аэрозоля [17].

Концентрации тяжелых металлов в разы падают с удалением от проезжей части, что может говорить о том, что загрязнение почвы, атмосферного воздуха и снежного покрова свинцом, медью и цинком происходит в результате эксплуатационного износа автомобильного транспорта, а именно: истирания шин и износа накладок тормозных механизмов [18].

Постоянно растущее количество автомобильного транспорта в Севастополе привело к существенному увеличению канцерогенов в виде N-нитрозаминов [19] и качественному изменению химического состава среды тем самым, вызывая серьезную экологическую проблему.

При анализе литературы, содержащей сведения о шинах как источнике загрязнения окружающей среды вдоль автомобильных дорог, установлено, что автомобильные шины, изнашиваясь в процессе эксплуатации, выделяют в окружающую среду летучие вещества и мелкие частицы в виде аэрозоля металлов кадмия, свинца, цинка, молибдена (до 60 % от всех загрязняющих и опасных для здоровья веществ).

По данным Севастополястата в 2013 году суммарные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу на территории города Севастополя составили 20,2 тыс. тонн и уменьшились в сравнении с 2012 годом на 2,42 %, в том числе: выбросы от стационарных источников - 2,6 тыс. тонн (12,87 % от суммарных выбросов), что на 18,75 % ниже уровня 2012 года; выбросы от передвижных источников - 17,6 тыс. тонн (87,13 %) от суммарных выбросов), что на 0,57 % выше уровня 2012 года. Но в 2014 году суммарные выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников в атмосферный воздух на территории города Севастополя составили 1,462 тыс. тонн и уменьшились в сравнении с 2013 годом уже на 43,7 %, таблице 2:

Таблица 2. Выбросы загрязняющих атмосферу веществ, отходящих от стационарных источников (тыс. тонн)

	2014г.	
	Всего	Из них выбрасываются без очистки
Всего выброшено в атмосферу ЗВ	1.938	1.448
в том числе:		
твердые вещества	0.970	0.480
газообразные и жидкие вещества	0.968	0.968
из них:		
диоксид серы	0.158	0.158
оксид углерода	0.150	0.150
оксиды азота, в пересчете на NO ₂	0.222	0.222
углеводороды (без ЛОС)	0.336	0.336
летучие органические соединения	0.061	0.061
прочие газообразные и жидкие	0.041	0.041

Уменьшение загрязнения атмосферного воздуха от стационарных источников, которое характерно для 2014 года, вероятно, связано как с общим уменьшением объемов производства промышленной деятельности в г. Севастополе, так и в целом с уменьшением количества предприятий, являющихся источником выбросов основных загрязнителей. Также переход на новые формы статистической отчетности повлиял на достоверность представляемых результатов.

Данные по выбросам от передвижных источников, а именно автомобильного транспорта города за 2014-2015 гг. отсутствуют.

Теплоснабжение жилых и общественных зданий Севастополя осуществляется от 85 ко-

тельных, 7 ведомственных котельных и Севастопольской ТЭЦ. Централизованным отоплением обеспечивается 4,8 млн. м² площади жилых зданий и 1,3 млн. м² площади общественных зданий. Централизованным горячим водоснабжением (ГВС) обеспечивается 120 тыс. человек. Производство тепловой энергии для централизованного отопления производится на 97 теплоисточниках. ГУПС «Севтеплоэнерго» отапливает 3 105 зданий, в том числе 2 649 зданий жилищного фонда города, 85 школы, 73 детских сада. Основным видом топлива для теплоснабжения города Севастополя является природный газ, который используется на 66 котельных. Кроме этого, 26 котельные используют уголь и 5 котельных используют мазут.

От автотранспорта и от выбросов централизованных и индивидуальных источников теплоснабжения, с дождевой водой и снегом в воды акватории Севастопольского региона поступают такие загрязняющие вещества, как нефтяные и хлорированные углеводороды, соединения меди, свинца, кадмия, другие химические элементы. В составе загрязнителей в воздушном бассейне Севастополя преобладают: пыль неорганическая, сернистый ангидрид, оксид углерода, оксид и диоксид азота. Воздушные массы насыщают осадки такими загрязняющими веществами нефтяного генезиса, как бензин, метан, гексан, ксилол, сольвент - нефть и др.

Основной процент загрязнений воздушного бассейна Севастополя приходится на следующие предприятия, представленные в таблице 3.

Необходимо отметить, что коммунальная инфраструктура Севастополя характеризуется значительным количеством автономных котельных малой мощности с низким КПД и отсутствием пылегазоочистных установок. Для обеспечения горячего водоснабжения (ГВС) используется низкосортное топливо, что связано, в первую очередь, с высокой ценой качественного топлива.

В исследованиях выполненных ранее одним из авторов [20] рассчитан суммарный (интегральный) индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) рекреационных территорий от одиночных источников (J_m). Расчет усредненной за рассматриваемый период (отопительный сезон) концентрации j -ого вещества в воздушном бассейне рекреационных территорий, оценка степени загрязненности атмосферного воздуха населенных пунктов выполнялись в соответствии с [21]. Полученный $J_m = 3,04$ соответствует уровню слабозагрязненной атмосферы.

Таблица 3. Предприятия г. Севастополя - основные источники аэротехногенных эмиссий в 2014 году

Административный район города	Наименование источника загрязнения	% загрязнения
Балаклавский район	АО «Балаклавское рудоуправление им. А.М. Горького»	12,32
	ООО «СГС Плюс» (ТЭЦ)	2,11
Ленинский район	ГУП города Севастополя «Водоканал»	10,52
	ГУП города Севастополя «Севтеплоэнерго»	27,92
Гагаринский район	«Тарида «Электрик»	11,03
	ООО «Югторсан»	1,03
	АТЛАНТИКА ГП, экспериментальный рыбообработывающий филиал	3,01
Нахимовский район	производство промышленного оборудования «Таврия»	0,91
	Севастопольский морской завод, судостроение и ремонт	0,65

Следует обратить внимание, что в данном случае, при расчете не учитывалось влияние выбросов автотранспорта и предприятий, расположенных вблизи рекреационных объектов, которые находятся в прибрежной зоне Севастопольского региона - более 200 санаторно-курортных объектов, 64 гостиницы и гостевых дома, 4 автокемпинга и 4 мотеля, 9 яхт-клубов, ряд туристских стоянок, апартаментов и частных вилл.

Так, например, 3 декабря 2012 года автоматическая система экологического мониторинга «ГИС-атмосфера» зафиксировала экстремально высокий уровень загрязнения воздушного бассейна в г. Севастополе [22]. С 7 утра и до 18.00 продолжался стремительный рост уровня загрязнения воздуха.

На графике динамики индекса загрязнения атмосферы отмечен рост с 4 до 25 единиц ИЗА (рис. 1).



Рис. 1. Суточная динамика ИЗА в г. Севастополе 3 декабря 2012 года

ИЗА используется в России с 1979 года для интегральной оценки уровня загрязнения воздушной среды города в целом или по районам, а также, для изучения связи между уровнем загрязнения атмосферного воздуха и заболеваемостью населения.

Несомненно, что ИЗА очень удобен для информирования населения о степени загрязненности атмосферного воздуха, т.к. позволяет представить интегральный уровень загрязнения воздуха города за год или другой период времени одним числом. Значение индекса показывает, во сколько раз суммарный уровень загрязнения воздуха превышает ПДК диоксида серы. На рис. 2 представлено изменение значения индекса загрязнения атмосферы г. Севастополя с 2010 по 2014 гг.



Рис. 2. Значение индекса загрязнения атмосферы

Также, на основании величин ИЗА атмосферы составляются перечни городов с особо неблагоприятной воздушной средой или наоборот. Так, по данным Росстата (бюллетень «Основные показатели охраны окружающей среды» за 2015 год) в рейтинге самых экологически чистых городов России с населением от 250 тыс. до 1 млн. человек по общему объему выбросов Севастополь занимает первое место. Но, в тоже время, полученные результаты исследований говорят о значительных превышениях основных показателей загрязнения атмосферного воздуха, что подтверждает вывод о недостаточности проводимых физико-химических мониторинговых исследований.

Необходимо обратить внимание, что т.к. в расчете ИЗА используются среднемесячные и среднегодовые концентрации аэротоксикантов, то данный показатель не может применяться для оперативного экологического контроля атмосферных загрязнений.

Для выявления источников загрязнения и экологической оценки последствий аэротехногенного загрязнения, необходимо использование точных данных о концентрациях приоритетных аэротоксикантов, что возможно достигнуть, на наш взгляд, только совершенствованием действующей системы мониторинга в городе.

Полученные результаты свидетельствуют о недостаточности данных мониторинговых исследований атмосферного воздуха в г. Севастополе, что не позволяет в полной мере выполнить оценку загрязнения воздушного бассейна города, учитывая вклад каждого из источников аэротехногенных эмиссий.

Заключение

Постепенное наращивание объемов производств, а также количества автотранспорта в городе приводит к увеличению объемов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух города Севастополя, и ухудшению экологической обстановки в целом.

Учитывая вышеизложенное, для снижения аэротехногенного загрязнения прибрежной урбанизированной территории Севастополя и оптимизации системы регионального мониторинга, необходимо:

- использовать мобильные передвижные экологические лаборатории для оперативного контроля выбросов в жилых районах города;
- увеличить количество стационарных постов мониторинга и расположить их в районах Севастополя с наибольшей антропогенной нагрузкой, вблизи автомагистралей и крупных промышленных объектов города, повысить точность измерений;
- ввести в эксплуатацию пост в г. Инкермане – внутригородском муниципальном образовании г. Севастополя, что позволит контролировать воздействие, осуществляемое от ЧФ РФ;
- применять традиционные методы биологического мониторинга, принципы которого разрабатываются во многих странах мира. Метод биомониторинга, а именно, биоиндикация, позволяет повысить точность прогнозных оценок качества атмосферного воз-

духа на территории города, подвергающейся техногенному воздействию.

Очевидно, что большое значение для прибрежной урбанизированной территории Севастополя имеет территориальное регулирование и перераспределение аэротехногенных нагрузок.

Список литературы

1. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 272 с.
2. Безуглая Э.Ю. Воздух городов и его изменения / Э.Ю. Безуглая, И.В. Смирнова. – СПб.: Астерон, 2008. – 254 с.
3. Денисов В.Н. Пути решения экологических проблем автотранспорта; научное учеб.-метод. справочное пособие / В.Н. Денисов [и др.]. – СПб.: Гуманистика, 2006. – 568 с.
4. Монин А.С. Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы / А.С. Монин, А.М. Обухов // Труды геофизического института АН СССР, 1954. – № 24. – 151 с.
5. Дмитриев М.Т. Механизм фотохимического загрязнения атмосферы / М.Т. Дмитриев, Н.А. Китросский, В.А. Попов // Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы: сб. науч. работ – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – С. 295 - 309.
6. Pasquill F. Factors determining pollution from local sources in industrial and urban areas // Met. Mag. 1972. – № 101. – pp. 1 - 8.
7. Пристли С.Х.Б. Турбулентный перенос в приземном слое атмосферы / С.Х.Б. Пристли; под ред. Д.Л. Лайхмана; пер. с англ. – Л.: Гидрометеоиздат, 1964. – 122 с.
8. Beniston M. Numerical modeling of regional-scale atmospheric flows, with application to air pollution // Proc. 5 th Int. Symp. Numer. Methods Eng., Lausanne, Sept. 11-15, 1989, Vol 1. Southampton etc.; Berlin etc, 1989. pp. 627 - 632.
9. Прохоров Б.Б. Введение в экологию человека – социально-демографический аспект / Б.Б. Прохоров. – М.: МНЭПУ, 1995. – 147 с.
10. Ревич Б.А. Об особенностях эколого-эпидемиологического изучения специфических экологически обусловленных изменений состояния здоровья населения / Б.А. Ревич // Гигиена и санитария, 2001. – № 5. – С. 49 - 53.
11. Шибанов С.Э. Влияние экологической ситуации на состояние здоровья населения Крыма / С.Э. Шибанов // Таврический медико-биологический вестник, 1998. – № 1-2. – С. 7 - 11.
12. Корчмит Ю.В. Проблемы прогнозирования загрязнения атмосферы Севастополя / Ю.В. Корчмит, Т.В. Подгорная, С.Ф. Федюнин // Сб. науч. тр. СМУЭИП. – Севастополь: СМУЭИП, 2011. – Вып. 1(37). – С. 91 - 98.
13. Сафронова Н.С. Анализ заболеваемости и распространенности болезней органов дыхания у

- населения Крыма / Н.С. Сафронова // Здоровье и образование в XXI веке, 2015. – Т. 17. – № 3. – С. 27 - 31.
14. Тулякова О.В. Влияние аэротехногенного загрязнения на антропологические показатели физического развития детей / О.В. Тулякова // Новые исследования. – 2013. – № 2. – С. 23 - 33.
 15. Косовская М.А. Организация фитомониторинга г. Севастополя / М.А. Косовская, Т.К. Хренова, В.Н. Григорьева // Сб. науч. тр. СКУЭИП. – Севастополь: СКУЭИП, 2014. – Вып. 4(48). – С. 81 – 87.
 16. Корчмит Ю.В. Загрязнение природной среды города Севастополя: справочно-методическое пособие. / Ю.В. Корчмит, А.А. Леонов. – Севастополь, 2009. – Ч. 1. – 172 с.
 17. Хесин А.И., Скудатин М.Е., Ушмодин В.Н. Канцерогенная опасность автомобильных шин [Электронный ресурс] - Национальная безопасность и геополитика России, 2003. – № 10-11 (51-52). Режим доступа: <http://www.hesintech.ru/>. (дата обращения 12.05.2016).
 18. Федосеенко А.А. Загрязнение окружающей среды продуктами эксплуатационного износа автомобильного транспорта [Электронный ресурс] – Технологии техносферной безопасности, 2015. – № 2(60). Режим доступа: <http://ipb.mos.ru/ttb>. (дата обращения 10.04.2016).
 19. Майстренко В.Н. Эколого-аналитический мониторинг суперэкоотоксикантов / В.Н. Майстренко, Р.З. Хамитов, Г.К. Будников. – М.: Химия, 1996. – 319 с.
 20. Климова Ю.Ю. Снижение техногенной нагрузки на атмосферный воздух рекреационных территорий Украины при сезонном ГВС / Ю.Ю. Климова, В.В. Макаров, А.Д. Баландович // Сб. науч. тр. СКУЭИП, 2013. – Вып. 3(47). – С. 63 - 70.
 21. Руководство по контролю загрязнения атмосферы РД 52.04.186–89. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 693 с.
 22. Требования для работы с системой «ГИС - АТМОСФЕРА» [Электронный ресурс]. URL: <http://gis-atmosfera.moreprom.ru/> (дата обращения: 25.02.2016).
- ### References
1. Berlyand M.E. *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery* [Forecast and regulation of pollution of the atmosphere]. L.: Gidrometeoizdat, 1985, 272 p.
 2. Bezuglaya E.Yu., Smirnova I.V. *Vozdukh gorodov i ego izmeneniya* [Air of the cities and his change]. SPb.: Asteron, 2008, 254 p.
 3. Denisov V.N. *Puti resheniya ehkologicheskikh problem avtotransporta: nauchnoe, ucheb.-metodicheskoe spravocnoe posobie* [Solutions of environmental problems of motor transport: scientific, studies. - the methodical handbook]. SPb.: Gumanistika, 2006, 568 p.
 4. Monin A.S., Obukhov A.M. The main regularities of turbulent hashing in a ground layer of the atmosphere. *Trudy geofizicheskogo instituta AN SSSR*, 1954, No 24, 151 p.
 5. Dmitriev M.T., Kitrosskij N.A. *Mekhanizm fotokhimicheskogo zagryazneniya atmosfery* [Mechanism of photochemical pollution of the atmosphere]. L.: Gidrometeoizdat, 1971, pp. 295 - 309.
 6. Pasquill F. Factors determining pollution from local sources in industrial and urban areas. *Met. Mag.* 1972, No 101, pp. 1 - 8.
 7. Pristli S.Kh.B. Turbulentnyj perenos v prizemnom sloe atmosfery [Turbulent transfer in a ground layer of the atmosphere]. L.: Gidrometeoizdat, 1964, 122 p.
 8. Beniston M. Numerical modeling of regional-scale atmospheric flows, with application to air pollution. *Proc. 5 th Int. Symp. Numere. Methods Eng.*, Lausanne, Sept. 11-15, 1989, Vol 1. Southampton etc.; Berlin etc, 1989, pp. 627 - 632.
 9. Prokhorov B.B. *Vvedenie v ehkologiyu cheloveka – sotsial'no-demograficheskij aspekt* [Introduction to ecology of the person – social and demographic aspect]. M.: MNEPU, 1995, 147 p.
 10. Revich B.A. About features of ekologo-epidemiological studying of the specific ecologically caused changes of a state of health of the population. *Gigiena i sanitariya*, 2001, No 5, pp. 49 - 53.
 11. Shibanov S.E. Influence of an ecological situation on a state of health of the population of the Crimea. *Taurian medicobiological messenger*, 1998. No 1-2. pp. 7 - 11.
 12. Korchmit Yu.V., Podgornaya T.V., Fedyunin S.F. Problems of forecasting of pollution of the atmosphere of Sevastopol. *Sbornik nauchnyh trudov SNUNE&I*, 2011, No. 1(37), pp. 91 - 98.
 13. Safronova N.S. The analysis of incidence and prevalence of diseases of respiratory organs at the population of the Crimea. *Zdorov'e i obrazovanie v XXI veke*, 2015, Vol 17, No. 3, pp. 27 - 31.
 14. Tulyakova O.V. Influence of aero technogenic pollution on anthropological indicators of physical development of children. *Novye issledovaniya*, 2013, No 2, pp.23-33.
 15. Kosovskaya M.A., Khrenova T.K., Grigor'eva V.N. Organization of phytomonitoring of Sevastopol. *Sbornik nauchnyh trudov SNUNE&I*, 2014, No 4(48), p.84-87.
 16. Korchmit Yu.V., Leonov A.A. *Zagryaznenie prirodnoj sredy goroda Sevastopolya: spravocno-metodicheskoe posobie. Chast' 1* [Pollution of environment of the city of Sevastopol: reference benefit. Part 1]. Sevastopol', 2009, 172 p.
 17. Khesin A.I., Skudatin M.E., Ushmodin V.N. [Cancerogenic danger of car tires]. *Natsional'naya bezopasnost' i geopolitika Rossii*, 2003, No 10-11 (51-52). (In Russ.) Available at: <http://www.hesintech.ru/>. (accessed 12.05.2016).

18. Fedoseenko A.A. [Environmental pollution by products of a service wear of a road transport]. *Tekhnologii tekhnosfernoj bezopasnosti*, 2015, No 2(60). (In Russ.) Available at: <http://ipb.mos.ru/ttb>. (accessed 10.04.2016).
19. Majstrenko V.N., Khamitov R.Z., Budnikov G.K. *Ekologo-analiticheskij monitoring superehko-toksikantov* [Ekologo-analiticheskij monitoring of supereko-toksikant]. M.: Khimiya, 1996, 319 p.
20. Klimova Yu.Yu., Makarov V.V., Balandovich A.D. Decrease in technogenic load of atmospheric air of recreational territories of Ukraine at seasonal HWS . *Sbornik nauchnyh trudov SNUNE&I*, 2013, No 3(47), pp. 63 - 70.
21. *Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery RD 52.04.186–89* [A management on control of pollution of the atmosphere of RD 52.04.186–89]. L.: Gidrometeoizdat, 1991, 693 p.
22. Trebovaniya dlya raboty s sistemoy «GIS - ATMOSFERA» [Requirements for work with the GIS-ATMOSFERA system]. URL: <http://gis-atmosfera.moreprom.ru/>. (accessed: 25.02.2016).

УДК 574

Очистка сточных вод от метанола и ацетона

В.А. Пухлий¹, А.А. Журавлев², А.К. Померанская³, П.В. Пухлий⁴^{1,2}ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия,^{3,4}Предприятие «Аэротекс», ул. Мурановская, 17-147, г. Москва, 127349, Россия^{1,3,4}pu1611@rambler.ru

Статья поступила 26.04.2016 г.; после доработки 28.04.2016 г.

Аннотация

Излагаются вопросы очистки сточных вод от метанола и ацетона на одном из предприятий химической промышленности. Для очистки многокомпонентных сред (метанола, ацетона, диазолина, серной кислоты) использовался процесс ректификации, при этом получались практически чистые компоненты, которые в дальнейшем использовались в качестве товарного продукта

Ключевые слова: очистка промышленных вод, вредные вещества, многокомпонентная смесь, ректификация, расчет холодильника дистиллята, дефлегматора

Sewage Treatment From Methanol and Acetone

V.A. Pukhly¹, A.A. Zhuravlev², A.K. Pomeranskaya³, P.V. Pukhly⁴^{1,2}Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,^{3,4}Aeroteks Enterprise, Moscow, 17-147 Muranovskaya st., Russia,^{1,3,4}pu1611@rambler.ru

Received 26.04.2016 y.; received in final form 28.04.2016 y.

Abstract

Questions of sewage treatment from methanol and acetone at one of the enterprises of chemical industry are stated. For cleaning of multicomponent environments (methanol, acetone, a diazolin, sulfuric acid) rectification process was used, at the same time almost pure components which were used further as a commodity product turned out.

Keywords: purification of industrial waters, harmful substances, multicomponent mix, rectification, calculation of the refrigerator of distillate, deflegmator.

Введение

Методы очистки вод промышленных и сельскохозяйственных предприятий весьма разнообразны. В ряде случаев промышленные стоки содержат примеси химических производств, сброс которых в канализацию запрещается санитарными нормами.

В основе очистки сточных вод промышленных и сельскохозяйственных предприятий лежат сложные физико-химические и биохимические процессы.

Сложность проблемы глубокой очистки сточных вод от различных примесей состоит в

том, что на практике не существует эффективного универсального способа, позволяющего достигнуть санитарных норм по всем присутствующим соединениям. В связи с этим на практике применяются различные способы очистки:

- механические (отстаивание, фильтрация, сепарация);
- сорбционные (адсорбция, десорбция, экстракция);
- химические (нейтрализация, коагуляция, флокуляция, ректификация);

- электрохимические (электролиз, электрокоагуляция, электродиализ);
- мембранные (ультрафильтрация и обратный осмос);
- озонирование;
- биологические;
- фотохимическое окисление (ФХО) с использованием различных окислителей и др.;
- термические.

Наибольшие сложности возникают при очистке сточных вод от органических соединений. Одним из наиболее эффективных способов грубой очистки сточных вод от органических соединений является сорбционный метод. В качестве сорбентов могут служить практически все тонкодисперсные вещества, обладающие развитой поверхностью: опилки, кокс, уголь, торф, глина. Зачастую используются специально приготовленные сорбенты – активные угли разных марок (АГ-3, БАУ, КАД, СКТ, СА), ионообменные смолы, активированные сорбенты, цеолиты. После сорбции сточные воды направляются на доочистку в аппараты, где используются деструктивные методы, заключающиеся в том, что под действием восстановительных и окислительных реакций, температуры и давления вредные соединения изменяют свою первоначальную структуру и состояние, превращаясь в другие соединения. Выбор деструктивных методов производится с учетом состава, вида соединений, свойств примесей, расходов газов и сточных вод, а также требований к качеству обезвреженных продуктов.

Для обезвреживания сточных вод от нефтепродуктов, сернистых и цианистых соединений, мышьяка, канцерогенных ароматических углеводородов и других вредных веществ в ряде случаев используется озон. При озонировании вода не загрязняется продуктами восстановления окислителя, что характерно при использовании хлора или хлорной извести.

Ректификация – один из самых распространенных технологических процессов в химической, нефтеперерабатывающей и во многих других отраслях промышленности.

Ректификация – это процесс разделения бинарных или многокомпонентных паровых, а также жидких смесей на практически чистые компоненты или их смеси, обогащенные легколетучими компонентами. При ректификации процесс осуществляется в результате контакта неравновесных потоков пара и жидкости.

Характерной особенностью процесса ректификации являются следующие условия обра-

зования неравновесных потоков пара и жидкости, вступающих в контакт: при разделении паровых смесей неравновесный поток жидкости (жидкостное орошение) образуется путем полной или частичной конденсации уходящего после контакта потока пара, в то время как при разделении жидких смесей неравновесный паровой поток (паровое орошение) образуется путем частичного испарения уходящей после контакта жидкости.

Возможность разделения смесей при ректификации обусловлена различием относительных летучестей компонентов смеси, вследствие чего создаются неравновесные потоки пара и жидкости, а также происходит дальнейшее обогащение пара легколетучими, а жидкости – тяжелолетучими компонентами.

Физической основой разделения в указанных процессах является массообмен между неравновесными потоками пара и жидкости: двухсторонний при ректификации.

Ректификация – массообменный процесс, который осуществляется в большинстве случаев в противоточных колонных аппаратах с контактными элементами (насадки, тарелки), аналогичными используемым в процессе абсорбции. Поэтому методы подхода к расчету и проектированию ректификационных и абсорбционных установок имеют много общего. Тем не менее ряд особенностей процесса ректификации (различное соотношение нагрузок по жидкости и пару в нижней и верхней частях колонны, переменные по высоте колонны физические свойства фаз и коэффициент распределения, совместное протекание процессов массо- и теплопереноса) осложняет его расчет.

Расчет ректификации многокомпонентных смесей выполняется, как правило, с помощью ЭВМ. Оптимальное проектирование и расчет таких установок подробно изложены в литературе [1, 2].

Расчет ректификационной колонны периодического действия сводится к определению ее основных геометрических размеров – диаметра и высоты, зависящих от физических свойств фаз, типа и размеров контактных устройств, гидродинамических режимов работы колонны. В современном турбомашиностроении находят применение так называемые диагональные нагнетатели (радиально-осевые), у которых рабочая среда перемещается в колесе по диагонали между радиальным и осевым направлением. Широко используются в турбомашиностроении диагональные гидротурбины, насосы, нагнетатели.

Постановка цели и задач научной работы

Целью научной работы является разработка технологии очистки сточных вод химических предприятий от вредных веществ в частности, метанола, серной кислоты, ацетона.

Для достижения поставленной цели необходимо осуществить расчет пилотной установки для очистки сточных вод. Данная задача решается на основе процесса ректификации, при этом степень очистки настолько высокая (99,9 %), что конечный продукт ректификации в дальнейшем используется как товарный продукт.

Расчет пилотной установки для очистки сточных вод от метанола и ацетона

В настоящем разделе представлен пилотный проект установки для очистки сточных вод от метанола и ацетона, выполненный предприятием АО «Аэротекс» для одного из предприятий химической промышленности. *Особенностью указанного процесса является получение из сточных вод товарного продукта – метанола.*

Исходная многокомпонентная смесь включает три компонента, обладающие сравнительно близкими летучестями: ацетон (CH_3COCH_3), метанол (CH_3OH) и воду. Остальные компоненты обладают низкими летучестями такого значения, что содержанием этих компонентов в парах можно пренебречь.

Разделение данной смеси может быть осуществлено двумя различными методами ректификации: периодической и непрерывной. Для осуществления непрерывной ректификации необходима установка двух ректификационных колонн, что представляет собой существенный недостаток из-за сильного увеличения стоимости проекта. Метод периодической ректификации позволяет разделить данную смесь в одной колонне. При этом в начале процесса происходит удаление из смеси основной части ацетона, и в завершающей стадии процесса идет получение 99 %-ного метанола.

Поскольку исходная смесь включает коррозионно-активные продукты (серную кислоту и 1,5-нафталиндисульфо-кислоту), перед началом ректификации смесь нейтрализуют либо NaOH , либо Na_2CO_3 до $\text{pH} = 7$. Желательно эти щелочные компоненты вводить в исходную смесь в твердом виде, т.к. введение в смесь дополнительного количества воды увеличит энергозатраты на процесс.

В качестве контактных элементов ректификационной колонны выбраны колпачковые тарелки, обладающие широким интервалом производительности по жидкости и пару. Кроме того, колонна с колпачковыми тарелками не опорожняется при прекращении подачи паров, что важно при периодической ректификации.

Предлагаемая схема очистки сточных вод от метанола и ацетона заключается в применении специально спроектированной ректификационной установки.

В действующем производстве на стадии получения чистого диазолина образуется как отход производства водный раствор метанола с примесями. Маточник от фильтрации чистого диазолина содержит: воду, метанол, серную кислоту, ацетон, 0,5-нафталиндисульфокислоту, диазолин и примеси.

От одной технологической операции образуется 830 л/оп. За сутки производится до 3-х операций. На единицу готового продукта получается 31,2 кг/кг. На годовой выпуск 12 т продукции получается маточников 374,4 тонн.

Разделение данной смеси производится способом периодической ректификации.

В настоящей работе при выполнении исследований использовалась программа расчета ректификационной колонны «METANOLVODA» на язык программирования «TURBOPASCAL 7.0».

Описание технологической схемы ректификационной установки для очистки сточных вод от метанола и ацетона

Технологическая схема ректификационной установки представлена на рис. 1.

На технологической схеме обозначены:

- КР – колонна ректификационная;
- К – кипятильник;
- Д – дефлегматор;
- Т – теплообменник;
- Х – холодильник;
- Н1-2 – насос центробежный;
- Е1-3 – емкость;
- Р – распределительный сосуд;
- В31-15 – вентиль запорный;
- ВР-4 – вентиль регулирующий.

Наименование сред в трубопроводах следующее: 1 – исходная смесь; 2 – дистиллят метанола; 3 – дистиллят метанол-ацетона; 4 – кубовый остаток; В4 – вода производственная; КЗ – канализация общего назначения; К7 – канализация химически загрязненной воды; Т8 – конденсат пара; Т7 – водяной пар.

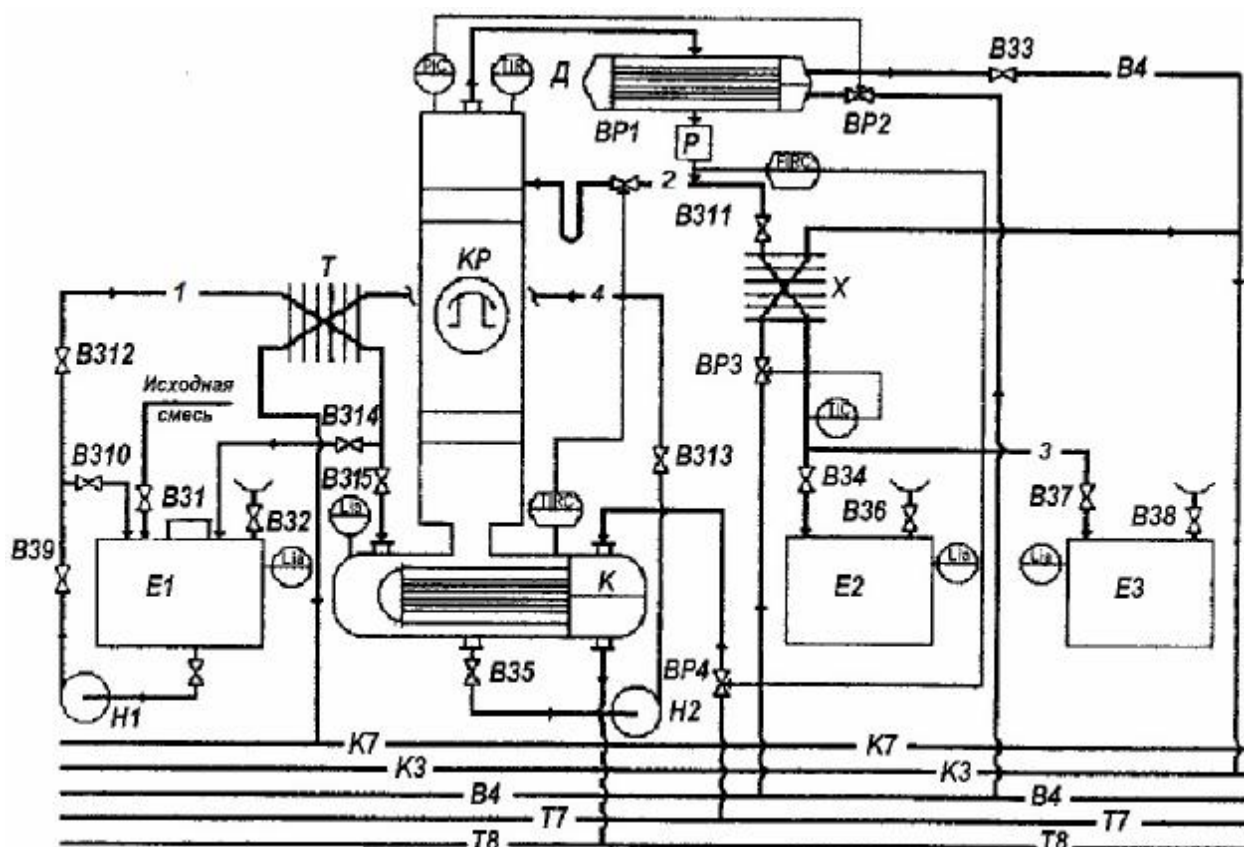


Рис. 1. Технологическая схема ректификационной установки для очистки сточных вод от метанола и ацетона

Ввиду того, что исходная смесь включает в себя серную кислоту и 1,5-нафталиндисульфоновую кислоту, способных вызвать коррозию аппаратуры, кислоты необходимо нейтрализовать либо NaOH , либо Na_2CO_3 . Щелочь загружается в емкость E1. Ее растворение происходит путем рециркуляции смеси насосом Н1 через вентиль B310. Нейтрализация происходит до $\text{pH} = 7$.

Нейтрализованная исходная смесь из емкости E1 насосом Н1 подается в теплообменник Т, где она нагревается за счет рекуперации тепла кубового остатка, подаваемого из кипятильника К ректификационной колонны КР насосом Н2 также в теплообменник Т; при этом исходная смесь из теплообменника Т снова возвращается в емкость E1. Нагрев исходной смеси происходит в течении 30 минут до полного перекачивания кубового остатка из кипятильника в канализацию K7. После этого подогретая исходная смесь подается в кипятильник К ректификационной колонны КР. Затем, после заполнения кипятильника исходной смесью в него подается греющий водяной пар, конденсирующийся в трубном пространстве кипятильника, нагревая при этом исходную смесь до температуры кипения.

Одновременно с этим в дефлегматор Д подается охлаждающая вода из линии воды B4.

Пары компонентов исходной смеси из кипятильника поднимаются по колпачковым тарелкам колонны КР, обогащаясь легколетучими компонентами. Выходя из верха колонны, обогащенные легколетучими компонентами пары конденсируются в дефлегматоре. Конденсат паров через разделительный сосуд Р частично в виде флегмы поступает на орошение ректификационной колонны (линия 2), проходя через гидрозатвор. Вторая часть конденсата в виде дистиллята через холодильник X стекает либо в приемную емкость E2, либо в емкость E3. В холодильнике дистиллят охлаждается от температуры конденсации до температуры $T = 30^\circ\text{C}$, проходя противотоком к охлаждающей воде, поступающей из линии B4.

В начале процесса ректификации осуществляется удаление большей части ацетона из смеси. Поскольку ацетон является наиболее легколетучим из всех присутствующих в смеси компонентов, в первое время ректификации конденсат сильно обогащен ацетоном. Ввиду того, что ацетон и метанол трудно разделимы из-за близкой летучести, в начале процесса наряду с аце-

тоном в конденсате присутствует и метанол, концентрация которого постепенно нарастает. Первый период ректификации, имеющий целью удаление ацетона, продолжается в течении времени до двух часов (точное время устанавливается при испытании колонны). Во время процесса удаления ацетона флегмовое число (соотношение потоков флегмы и дистиллята) поддерживается примерно равным 200. После удаления большей части ацетона (примерно 58 %) флегмовое число понижается до значения 1,29, тем самым начинается процесс отделения метанола от других компонентов смеси (воды, сульфата натрия и др.).

Ввиду того, что содержание метанола в дистилляте должно быть не менее 99%, процесс периодической ректификации ведется с постоянно увеличивающимся флегмовым числом, величина которого задается содержанием метанола в кубовом остатке. В свою очередь содержание метанола в кубовом остатке определяет его температуру кипения. Таким образом, флегмовое число автоматически регулируется вентилем ВР1 в соответствии с температурой кипения кубового остатка. Соответственно этому расход дистиллята во времени процесса постоянно уменьшается, так как общее количество производимых паров во время ректификации остается постоянным. Дистиллят метанола собирается в емкость Е2, а дистиллят смеси ацетон-метанол собирается в емкость Е3.

Технологическая схема предусматривает измерение, регистрацию и автоматическое регулирование ряда параметров. Кроме описанного выше регулирования флегмового числа регулируется давление в колонне, расход пара в кипятильнике и температура охлаждения дистиллята. Давление в колонне (атмосферное) регулируется подачей воды в дефлегматор.

Расчет ректификационной колонны

Исходные данные для расчета: Загрузка одной операции ректификации – 830 л (737,82 кг).

Состав исходной смеси:

вода	– 36,0 %;
метанол (CH_3OH)	– 57,0 %;
серная кислота (H_2SO_4)	– 3,3 %;
ацетон (CH_3COCH_3)	– 0,8 %;
1,5-нафталиндисульфокислота	– 1,7 %;
диазолин и примеси	– 1,9 %.

Концентрация метанола в получаемом дистилляте составляет 99 %.

Давление в колонне – 760 мм рт. ст.

На рис. 2 представлен эскиз ректификационной колонны.

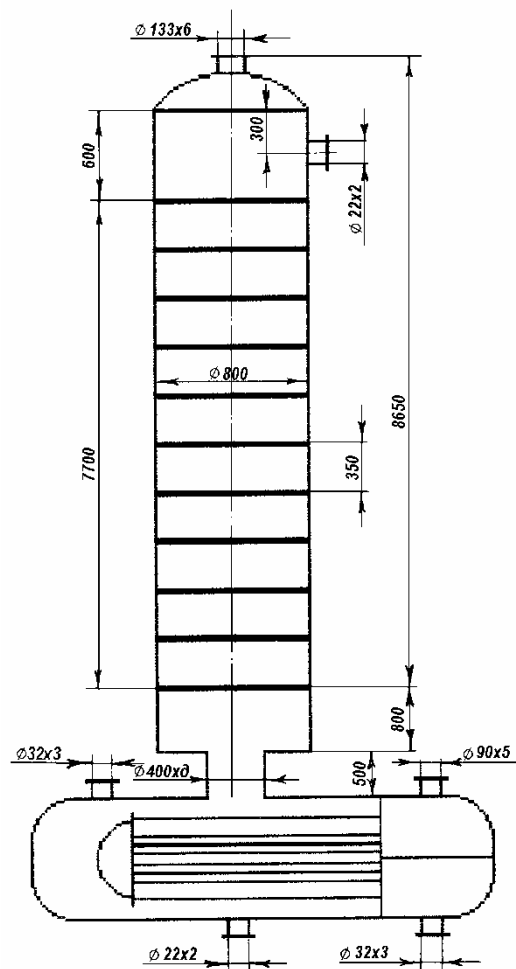


Рис. 2. Эскиз ректификационной колонны

При нейтрализации кислот, содержащихся в исходной смеси, вводится стехиометрическое количество NaOH (23,28 кг). Таким образом, загрузка на одну операцию составляет $23,28 + 737,82 = 761,1$ кг. Содержание метанола в этой смеси – 55,3 % масс., содержание ацетона – 0,78 % масс. При содержании метанола в кубовом остатке, равном 1 % количество получаемого дистиллята метанола – 421,7 кг. Соответственно количество кубового остатка – 339,4 кг.

В начале процесса ректификации удаляется наиболее легколетучий компонент – ацетон. Ввиду того, что его содержание в исходной смеси мало, минимальное флегмовое число, необходимое для отделения ацетона от метанола равно 96,8. Проведение процесса ректификации с рабочим флегмовым числом, равным примерно 200 по расчету потребует 9 теоретических или 16 реальных тарелок. При этом процесс отделения основной части ацетона (85 %) идет в течении 2-х часов с получением 10,2 кг дистиллята

ацетон–метанол (концентрация ацетона в дистилляте – 50 %). После отделения основной части ацетона ведется отгонка метанола от воды и других компонентов.

Основная задача ректификационной колонны состоит в получении метанола с его содержанием в дистилляте 99 % и выше.

Рассматривались варианты расчета при содержании метанола 99 % и 99,9 %.

Расчет ректификационной колонны включает основные разделы:

- определение равновесия в системе «пар-жидкость»;
- определение минимального и рабочего флегмового числа;
- расчет физико-химических свойств пара и жидкости для температуры верха и низа колонны;
- определение времени периодической ректификации;
- определение скорости пара в колонне и диаметра колонны;
- расчет коэффициентов массоотдачи в паровой и жидкой фазе;
- расчет уноса жидкости паром и КПД по Мэрфри для каждой тарелки;
- расчет числа реальных тарелок;
- определение гидравлического сопротивления колонны.

Ниже приводится вариант расчета ректификационной колонны.

Расчет материального баланса

Ведется по формулам:

$$F = D + W, \quad (1)$$

$$FX_f = DX_d + WX_w, \quad (2)$$

где F – масса исходной смеси, кг;

D, W – массы дистиллята и кубового остатка соответственно, кг;

X_f, X_d, X_w – массовые доли метанола в исходной смеси, дистилляте и кубовом остатке.

При $F = 761,1$ кг имеем:

$$X_f = 0,553; X_d = 0,99; X_w = 0,01.$$

Из решения уравнений (1) и (2) получим:

$$D = 421,7 \text{ кг}; \quad W = 339,4 \text{ кг}.$$

Определение рабочего флегмового числа

Минимальное флегмовое число (в начальный момент ректификации):

$$R_{\min}(X_f) = (X_d - Y_f^*) / (Y_f^* - X_f), \quad (3)$$

где Y_f – концентрация метанола в паре, равновесном с исходной жидкостью.

Произведя вычисления, получим

$$R_{\min} = 0,765.$$

Рабочее флегмовое число определялось двумя способами:

- по уравнению $R = 1,3R_{\min} + 0,3$;

- по уравнению $R = (1,1 \div 3)R_{\min}$.

В результате получим: $R = 1,29$.

Результаты расчета ректификационной колонны

В соответствии с программой «METANOLVODA» на языке программирования «TURBOPASCAL 7.0.» на ЭВМ были рассчитаны два варианта:

1) ректификация при содержании метанола в дистилляте 99 %;

2) ректификация при содержании метанола в дистилляте 99,9 %.

1). *Результаты расчета ректификации при содержании метанола в дистилляте 99 %.*

Количество дистиллята $D = 421,71$ кг.

Количество кубового остатка $W = 339,39$ кг.

Время на ректификацию – 2,55 часов.

Минимальное начальное флегмовое число

$$R_{\min}(X_f) = 0,77.$$

Начальное рабочее флегмовое число

$$R_{\min}(X_f) = 1,29.$$

Минимальное конечное флегмовое число

$$R_{\min}(X_w) = 38,65.$$

Конечное рабочее флегмовое число

$$R_{\min}(X_w) = 50,55.$$

Число теоретических тарелок – 8,6.

Диаметр колонны $D_K = 600$ мм.

Скорость пара $W = 0,846$ м/с.

Расстояние между тарелками $h_T = 0,35$ м.

Характеристики тарелки:

- тип тарелки – колпачковая ТСК-1, ОСТ 26-01-282-74;
- периметр слива $L_C = 0,48$ м;
- относительная площадь для прохода паров $F_C = 0,25$;
- рабочее сечение тарелки $S_T = 0,256$ м²;
- число колпачков – 13;
- диаметр колпачка – 80 мм.

Число реальных тарелок – 12 (для разделения смеси метанол-вода).

Для разделения смеси метанол–ацетон число реальных тарелок – 15.

Гидравлическое сопротивление колонны – 6509 Па.

Высота тарельчатой части колонны – 4,9 м.

Общая высота колонны – 7,0 м.

Унос жидкости паром:

- для верхней тарелки – 0,206;
 - для нижней тарелки – 0,205.
- КПД по Мэрффи:
- для верхней тарелки $EM_Y = 0,673$;
 - для нижней тарелки $EM_Y = 0,498$.

2). *Результаты расчета ректификации при содержании метанола в дистилляте 99,9%.*

Количество дистиллята $D = 417,87$ кг.

Количество кубового остатка $W = 343,23$ кг.

Время на ректификацию – 2,5 часов.

Минимальное начальное флегмовое число

$$R_{\min}(X_f) = 0,81.$$

Начальное рабочее флегмовое число

$$R_{\min}(X_f) = 2,45.$$

Минимальное конечное флегмовое число

$$R_{\min}(X_W) = 39,3.$$

Конечное рабочее флегмовое число

$$R_{\min}(X_W) = 60,0.$$

Число теоретических тарелок – 13,6.

Диаметр колонны $D_K = 800$ мм.

Скорость пара $W = 0,835$ м/с.

Расстояние между тарелками $h_T = 0,35$ м.

Характеристики тарелки

Тип тарелки – колпачковая ТСК-1, ОСТ 26-01-282-74.

Число колпачков – 24.

Диаметр колпачка – 80 мм.

Число реальных тарелок – 15.

Гидравлическое сопротивление колонны – 6509 Па.

Высота тарельчатой части колонны – 4,9 м.

Общая высота колонны – 7,0 м.

Унос жидкости паром:

- для верхней тарелки – 0,191;
 - для нижней тарелки – 0,188.
- КПД по Мэрффи:
- для верхней тарелки $EM_Y = 0,745$;
 - для нижней тарелки $EM_Y = 0,578$.

Полное время цикла работы ректификационной колонны включает:

- нагрев исходной смеси кубовым остатком – 0,5 ч;

- перекачка исходной смеси и нагрев ее в кипяильнике – 0,5 ч;
 - выход колонны на рабочий режим – 0,75 ч;
 - отгонка смеси ацетон-метанол – 2,0 ч;
 - получение метанола – 2,55 ч;
- Итого полное время цикла – 6,3 ч.

Полная высота установки рассчитывается исходя из следующих размеров частей установки:

- опора – 0,6 м;
 - кипяильник – 0,8 м;
 - колонна (для содержания метанола в дистилляте 99,9 %) – 7,7 м;
 - дефлегматор – 0,4 м;
 - расстояние между крышкой колонны и дефлегматором – 0,5 м;
- Итого полная высота установки – 10,0 м.

Энергетические затраты в установке (в расчете на цикл работы).

Расход пара: $0,146 \cdot 6,3 \cdot 3000 + (102 - 48,1) \cdot 2,86 \cdot 761,1 / 2204,1 = 2838,97$ кг.

Расход электроэнергии: $116 \cdot 30 \cdot 60 + 517 \cdot 4560 = 1395,9$ кДж.

Количество метанола, получаемого за цикл (в пересчете на 100 %):

$$421,7 \cdot 0,99 - 10,2 \cdot 0,5 = 412,4 \text{ кг.}$$

Расчет кипяильника (К)

Тепловой поток определяется по формуле:

$$Q_K \cdot 0,95 = D_1(R_1 + 1)(C_d t_d + r_d) - D_K R_K C_d t_d, \quad (4)$$

где D_1 , D_K – начальная и конечная производительность по дистилляту; C_d , r_d – теплоемкость и теплота конденсации дистиллята; t_d – температура конденсации дистиллята.

$$Q_K = \frac{\left(\frac{421,7}{3600(1,29 + 1)(2,8 \cdot 64,8 + 1131,6)} \right) - 0,0052 \cdot 50,5 \cdot 2,8 \cdot 64,8}{0,95} = 320,5 \text{ кВт.}$$

Температура кипения смеси $t_K = 102$ °С.

Температура греющего пара определяется следующим образом:

$$T = t_K + 20 = 102 + 20 = 122$$
 °С.

Давление греющего пара: $P = 2,12$ бар.

Расход греющего пара

$$G_{II} = 320,5 / 2201,4 = 0,146 \text{ кг/с.}$$

Выбираем кожухотрубный кипяильник с паровым пространством. Греющая поверхность – трубный пучок с плавающей головкой.

Коэффициент теплоотдачи от греющего пара определяется по уравнению:

$$\alpha_1 = 1,85 A^2 \cdot \Delta t_{\text{конд}} \cdot L^{0,7} d^{-0,5}, \quad (5)$$

где L – длина трубного пучка, м; d – внутренний диаметр труб, м.

При $T = 122^\circ\text{C}$ получим $A = 7,7$.

Примем для расчета пучок труб диаметром 25×2 мм и длиной 3 м.

Таким образом получим:

$$\alpha_1 = 1,85 \cdot 7,7^2 \cdot 3^{0,7} \cdot 0,021^{-0,5} = 1633,2.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенок труб к кипящему раствору может быть определен по уравнению:

$$\alpha_2 = 2,72 \cdot \varphi \cdot P_{\text{абс}}^{0,4} \cdot q^{0,7}, \quad (6)$$

где φ – коэффициент, учитывающий физические свойства жидкости; $P_{\text{абс}}$ – давление в кипятильнике, кгс/см²; q – плотность теплового потока, Вт/м².

Для кипения исходной смеси с содержанием метанола 55,3 % $\varphi = 0,61$. В расчете кипятильника теплоотдачу к кипящей жидкости нужно рассматривать для исходной смеси, так как в этом случае скорость теплообмена минимальна и расчетная поверхность теплообмена является максимальной.

$$\alpha_2 = 2,72 \cdot 0,61 \left(\frac{760}{735} \right)^{0,4} \cdot q^{0,7} = 1,68 q^{0,7},$$

или

$$\alpha_2 = c q^{0,7},$$

где $c = 1,68$.

Это уравнение можно записать как функцию от $\Delta t_{\text{кип}}$

$$\alpha_2 = c^{\frac{1}{1-0,7}} \cdot \Delta t_{\text{кип}}^{\frac{0,7}{1-0,7}}. \quad (7)$$

Уравнения, описывающие α_1 и α_2 , позволяют определить коэффициент теплопередачи по уравнению

$$\frac{K^{0,5} (T - t_K)^{-0,5}}{A_1^{0,5}} + K \sum r_i + \frac{K^{1-0,7} (T - t_K)^{-0,7}}{C} = 1, \quad (8)$$

где K – коэффициент теплопередачи; $\sum r_i$ – сумма термических сопротивлений стенки и загрязнений.

$$\sum r_i = 3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}.$$

Подставляя значения величин в уравнение (8), получим:

$$0,00553 \cdot K^{0,5} + 3 \cdot 10^{-4} \cdot K + 0,0731 \cdot K^{0,3} = 1. \quad (9)$$

Из решения (9) имеем:

$$K = 902,3 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

Требуемая поверхность теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{cp}}} = \frac{320,5 \times 1000}{902,3 \times 20} = 17,76 \text{ м}^2.$$

Для того, чтобы иметь резерв поверхности теплопередачи в случае увеличения флегмового числа (при снижении X_w или увеличении X_f возьмем пучок горизонтальных труб со следующими параметрами (по ГОСТ 14247-79):

- диаметр труб $d = 25 \times 2$ мм;
- длина труб $l = 3$ м;
- число труб $n = 98$;
- поверхность теплопередачи 23 м^2 .

Диаметр кожуха принят $D = 800$ мм – для заливки в куб 830 л раствора.

Расчет дефлегматора (Д)

Определим нагрузку по пару:

$$G_{\text{II}} = D_1 (R_1 + 1) = 421,7 / 3600 (1,29 + 1) = 0,268 \text{ кг/с}.$$

Температура конденсации: $t = 64,8^\circ\text{C}$.

Тепловой поток:

$$Q_{\text{кон}} = G_{\text{II}} = 1131,6 \cdot 0,268 = 303,26 \text{ кВт}.$$

Начальная температура охлаждающей воды:

$$t_{\text{H}} = 20^\circ\text{C}.$$

Конечная температура t_K должна удовлетворять следующим требованиям:

$$t_K < 55^\circ\text{C}; (t - t_K) > 10^\circ\text{C}.$$

Примем $(t - t_K) = 30^\circ\text{C}$, тогда

$$t_K = 64,8 - 30 = 34,8^\circ\text{C}.$$

Расход охлаждающей воды

$$G_{\text{В}} = \frac{303,26}{4,19(34,8 - 20)} = 4,9 \text{ кг/с}.$$

Средняя разность температур:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{(64,8 - 20) - (64,8 - 34,8)}{\ln \frac{64,8 - 20}{64,8 - 34,8}} = 36,91.$$

Средняя температура охлаждающей воды

$$t = 64,8 - 36,91 = 27,9^\circ\text{C}.$$

Для расчета стандартного теплообменника принимаем в первом приближении ориентировочно значение коэффициента теплопередачи $K = 500 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

Приближенное значение поверхности теплопередачи:

$$F = \frac{309,26 \cdot 1000}{500 \cdot 36,81} = 16,43 \text{ м}^2.$$

Примем для расчета кожухотрубный теплообменник со следующими параметрами (по ГОСТ 14247-79):

- поверхность теплопередачи – 23 м²;
- длина труб – 3 м;
- число труб – 98;
- число ходов – 2;
- площадь сечения одного хода – 0,012 м²;
- диаметр кожуха – 400 мм.

Проведем расчет теплопередачи со стороны воды.

Вычислим скорость воды:

$$W = \frac{4,9}{996 \cdot 0,012} = 0,41 \text{ м/с.}$$

Определим критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{0,41 \cdot 0,021 \cdot 996}{0,845 \cdot 10^{-3}} = 10148,6.$$

Коэффициент теплоотдачи определяется по формуле:

$$\alpha_2 = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \lambda / d. \quad (10)$$

Подставляя значения в формулу (10), получим:

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot 10148,6^{0,8} \cdot 5,76^{0,4} \frac{0,614}{0,021} =$$

$$= 2172,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Коэффициент теплоотдачи со стороны паров определяется по формуле:

$$\alpha_1 = 2,02 \cdot e^{\frac{1}{3}} \cdot l \cdot \sqrt[3]{\frac{r_{\text{ж}}^2 \cdot L \cdot n}{m \cdot G_n}}. \quad (11)$$

Подставляя значения в формулу (11), получим:

$$\alpha_1 = 2,02 \cdot 0,6^{\frac{1}{3}} \cdot 0,204 \cdot \sqrt[3]{\frac{750,9^2 \cdot 3 \cdot 98}{0,329 \cdot 10^{-3} \cdot 0,268}} =$$

$$= 2573,8 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

Параметры воды:

$$\rho = 996 \text{ кг/м}^3; \lambda = 0,614 \text{ Вт/м.}$$

При $t = 27,9^\circ\text{C}$,

$$\mu = 0,845 \text{ мПа}\cdot\text{с},$$

$$Pr = 5,76.$$

Сумма термических сопротивлений стенки и загрязнений:

$$\sum r_i = 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C/Вт}.$$

Коэффициент теплопередачи определяется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r_i + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (12)$$

Подставляя значения в формулу (12), получим:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{2573,8} + 5,3 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{2172,6}} =$$

$$= 725,3 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Вычисляем поверхность теплопередачи:

$$F = \frac{303,26 \cdot 1000}{725,3 \cdot 96,91} = 11,33 \text{ м}^2.$$

Запас поверхности теплообмена, равный 11,67 м² необходим в случае увеличения флегмового числа и увеличения начальной температуры охлаждающей воды.

Расчет холодильника дистиллята (X)

Максимальный расход дистиллята (в начале работы ректификационной установки):

$$D = 421,7 \text{ кг/ч} = 0,117 \text{ кг/с}.$$

Начальная, конечная и средняя температуры дистиллята:

$$t_{1H} = 64,8^\circ\text{C}; \quad t_{1K} = 30^\circ\text{C};$$

$$t_{1CP} = 47,4^\circ\text{C}.$$

Начальная и конечная температуры охлаждающей воды: $t_{2H} = 20^\circ\text{C}$, $t_{2K} = 25^\circ\text{C}$. Вычислим тепловой поток в холодильнике:

$$Q_X = 0,1172,7(64,8 - 30) = 11,0 \text{ кВт}.$$

Определим среднюю разность температур:

$$\Delta t_{CP} = \frac{(64,8 - 25) - (30 - 20)}{\ln \frac{39,8}{10}} = 21,57.$$

Принимаем для расчета разборный пластинчатый теплообменник со следующими параметрами (по ГОСТ 15518-83):

- поверхность теплообмена – 5 м²;
- число пластин – 28;
- площадь пластины – 0,2 м;
- поперечное сечение канала – 17,8;
- габариты пластины (длина, ширина, высота) – 960×460×1 мм;
- эквивалентный диаметр канала – 8,8 мм;
- длина канала – 0,518 м;
- компоновка – 5 + 5 + 4/5 + 5 + 4.

Определяем скорость дистиллята в каналах:

$$W = \frac{0,117}{(17,8 \cdot 10 \cdot 5767)} = 0,0171 \text{ м/с}.$$

Вычисляем критерии Рейнольдса, Прандтля и коэффициент α_1 :

$$Re = \frac{0,0171 \cdot 8,8 \cdot 10^{-3} \cdot 767}{0,406 \cdot 10^{-3}} = 284,9;$$

$$Pr = \frac{2,7 \cdot 10^3 \cdot 0,406 \cdot 10^{-3}}{208 \cdot 10^{-3}} = 5,27;$$

$$\alpha_1 = \frac{0,065 \cdot 284,9^{0,73} \cdot 5,27^{0,33} \cdot 0,208}{8,8 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 164,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Определяем скорость воды в каналах:

$$W = \frac{0,263}{(17,8 \cdot 10 \cdot 5997)} = 0,0296 \text{ м/с.}$$

Вычисляем критерии Прандтля, Рейнольдса и коэффициент α_2 :

$$Pr = 6,22;$$

$$Re = \frac{0,0296 \cdot 8,8 \cdot 10^{-3} \cdot 997}{0,902 \cdot 10^{-3}} = 288,0;$$

$$\alpha_2 = \frac{0,065 \cdot 288^{0,73} \cdot 6,62^{0,33} \cdot 0,61}{8,8 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 527,2 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C.}$$

Вычисляем коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1}{\frac{1}{527,2} + 7,5 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{164,7}} = 114,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Тогда поверхность теплопередачи

$$F = \frac{11 \cdot 1000}{114,7 \cdot 21,57} = 4,45 \text{ м}^2.$$

Параметры емкостей

На основании расчетов в соответствии с технологической схемой установки (рис. 1) получим:

Объемы емкостей:

$$E1 - 1,1 \text{ м}^3;$$

$$E2 - 0,67 \text{ м}^3;$$

$$E3 - 30 \text{ л.}$$

Расчеты кипяtilьника, холодильника и теплообменника осуществляются по методикам, изложенным в [1].

Заключение

Разработана технологическая схема очистки сточных вод химических предприятий от вредных веществ, в частности, метанола, ацетона на основе процесса ректификации.

Осуществлен расчет ректификационной колонны на основе программы «METANOLVODA» на языке программирования «TURBOPASCAL 7.0»

Список литературы

1. Основные процессы и аппараты химической технологии; пособие по проектированию / под ред. Ю.И. Дытнерского. – М.: Химия, 1991. – 496 с.
2. Анисимов И.В. Математическое моделирование и оптимизация ректификационных установок / И.В. Анисимов, В.И. Бодров. – М.: Химия, 1975. – 215 с.

References

1. *Osnovnye protsesy i apparaty khimicheskoy tekhnologii; posobie po proektirovaniyu* [Basic processes and apparatuses of chemical technology: A guide for the design]. Edited by Yu Dytnerskogo. Moscow, Chemistry, 1991. 496 p.
2. Anisimov I.V., Bodrov V.I. *Matematicheskoe modelirovanie i optimisatsiya rektifikatsionnykh ustanovok* [Mathematical modeling and optimization of distillation units]. Moscow, Chemistry, 1975. 215 p.

УДК 541.49:621.039.73

Исследование влияния ионов меди, никеля, кальция, магния и pH на определение железа (III) в питьевой воде

С.А. Федорова¹, Д.И. Безбородова²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ^{1,2} Sevwp@mail.ru

Статья поступила 06.06.2016 г.; после доработки 08.06.2016 г.

Аннотация

При использовании полного факторного эксперимента определено в количественной форме влияние ионов меди, никеля, кальция, магния и pH на определение железа (III) роданидным методом. Получены характеристические уравнения. Показано, что при концентрации ионов Cu^{2+} в интервале от 0,2 мг/л до 0,5 мг/л и Ni^{2+} в интервале от 0,02 мг/л до 0,05 мг/л содержание Fe^{3+} повышается на 16,7 %.

Ключевые слова: Cu^{2+} , Ni^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} , pH, полный факторный эксперимент.

Research of Influence copper, Nickel, Calcium, Magnesium Ions and pH on the Determination of Iron (III) in Drinking Water

S.A. Fedorova¹, D.I. Bezborodova²Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, ^{1,2} Sevwp@mail.ru

Received 06.06.2016 y.; received in final form 08.06.2016 y.

Abstract

When using a full factor experiment is determined impact in quantify form of copper, nickel, calcium, magnesium ions and pH on the determination of iron (III) by nidnym-type method. The characteristic equation has been reached. It is shown that the concentration of Cu^{2+} ions in the range from 0.2 mg / l to 0,5 mg / l and Ni^{2+} ions in the range from 0.02 mg / L to 0.05 mg / l content of Fe^{3+} in water increases on 16,7 %.

Keywords: Cu^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{3+} , full factorial experiment, the drinking water.

Введение

В Российской Федерации пристальное внимание уделяется качеству питьевой воды. Существует ряд нормативных документов и ГОСТов, руководствуясь которыми осуществляется контроль качества воды. Разработано достаточное количество нормируемых и контролируемых показателей химической загрязненности [1-4]. Контроль осуществляют с помощью специальных методик и регистрирующих приборов, позволяющих выполнять количественные измерения и качественные определения. Однако, качество воды на выходе с водоподготовительной станции отличается от воды, которую потребитель получает из крана. В основном это связано

с коррозионными процессами трубопроводов, по которым воды доставляется наши дома.

О количестве коррозионных продуктов можно судить по результатам анализа воды на содержание железа (III). Именно поэтому для исследования мы выбрали концентрацию ионов железа, но учитывая, что в воде помимо Fe^{3+} присутствуют и другие компоненты, мы решили выяснить в какой степени они могут влиять на его определение.

О количестве коррозионных продуктов можно судить по результатам анализа воды на содержание железа (III). Именно поэтому для исследования мы выбрали концентрацию ионов железа, но учитывая, что в воде помимо Fe^{3+}

присутствуют и другие компоненты, мы решили выяснить в какой степени они могут влиять на его определение.

Постановка цели и задач научной работы

Целью работы является экспериментальное определение количественной зависимости, характеризующей влияние содержания солей жесткости и комплексообразователей (ионов меди и/или никеля) при различных рН на определение содержания железа в питьевой воде.

Задача исследования заключалась в том, чтобы в количественной форме определить насколько влияния вышеперечисленных ионов отражается на точности результатов определения железа в питьевой воде.

Основная часть

Для определения железа (Ш) руководствовались методикой с применением роданида аммония [5-7]. Выбранная методика основана на образовании комплексных соединений, поэтому в качестве факторов влияющих на определение железа были выбраны комплексообразователи: ионы меди и/или никеля. В отложениях на стенках трубопроводов присутствуют как продукты коррозии, в частности, оксиды железа, так и карбонаты кальция и магния, обусловленные наличием солей жесткости в воде. Поэтому, к рассматриваемым факторам, добавили содержание ионов кальция и магния. Чувствительность к среде характеризовали показателем рН – пятый фактор в анализируемой группе показателей. Для проведения эксперимента использовали полный факторный эксперимент (ПФЭ), который позволяет сократить количество опытов, сохраняя при этом надежность результатов.

Существенным моментом при использовании ПФЭ является выбор нулевого уровня. В качестве базового мы руководствовались нормами по содержанию химических веществ в питьевой воде (табл.).

Таблица. Нормы по содержанию химических веществ в питьевой воде РФ

Показатели	Ед.измерения	ПДК
рН	Ед. рН	6,0-9,0
Кальций	Мг-экв/л	100
Магний	Мг-экв/л	30
Железо	Мг/л	0,3
Медь	Мг/л	1,0
Никель	Мг/л	0,05

При проведении анализов в СЭС городов РФ строго регламентированы методы и методики определения анализа. Так анализ железа (Ш) следует проводить фотометрически, с применением сульфосалициловой кислоты или роданида. Мы проводили анализ с помощью роданида аммония.

Роданидный метод основан на образовании окрашенных комплексных соединений при взаимодействии роданид-ионов аммония или калия с ионами трехвалентного железа в кислой среде. Позволяет определять железо в диапазоне 0,05...4,0 мг в 1 л воды. Роданидные комплексы являются достаточно устойчивыми. Но стоит заметить, что с помощью предложенного метода может определяться не только железо. Роданид может образовывать комплексы, как с железом, так и с медью, никелем, что может повлиять на конечный результат анализа главного компонента. Помимо комплексообразующих ионов в питьевой воде наблюдается постоянное присутствие солей жесткости, что тоже может отражаться на определении железа.

В качестве варьируемых факторов (X_i) были выбраны: X_1 -рН, X_2 -концентрация ионов меди, X_3 - концентрация ионов кальция, X_4 -концентрация ионов магния, X_5 -концентрация ионов никеля. Исследуемый компонент Fe^{3+} взят в концентрации соответствующей нормам СанПиН.

Интервал варьирования рН выбран в соответствии с нормальным для человека значением, которое составляет 7.4. Концентрация ионов Cu^{2+} , согласно ПДК меди в питьевой воде, которое не должно превышать 1 мг/л.

В соответствии с матрицей планирования готовили параллельные пробы. В качестве контролируемой величины использовали оптическую плотность. Была проведена серия опытов с различными значениями верхнего, нижнего и нулевого уровней по каждому из факторов. Изменения интервалов варьирования проводили в зависимости от контролируемых характеристик предыдущего шага.

Экспериментальная часть

Исследуемый компонент – Fe^{3+} взят в концентрации 0,3 мг/л, рН варьировали от 5 до 10. Концентрация ионов Cu^{2+} – от 0,1 мг/л до 0,5 мг/л. Концентрация ионов Ca^{2+} – от 0,1 мг/л до 0,5 мг/л. Концентрация ионов Mg^{2+} – от 0,1 мг/л до 0,5 мг/л. Концентрация ионов Ni^{2+} – от 0,05 мг/л до 0,1 мг/л. Оценка дисперсии для каждой серии параллельных опытов находилась в интервале от $6 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-6}$. Так как расчетное значение

ние критерия Кохрена (0,93) оказалось меньше табличного (0,967), мы можем сделать вывод, что дисперсия однородна. Оценка дисперсии воспроизводимости составила 0,0009. Ошибка в вычислении коэффициентов регрессии составила 0,006. для оценки значимости коэффициентов регрессии использовали критерий Стьюдента. Расчетные значения коэффициентов значимы.

Искомое уравнение имеет вид:

$$Y = 0.74 - 0.017x_1 - 0.0017x_2 + 0.011x_3 + 0.006x_4$$

Оценка адекватности уравнения регрессии у пределах от 0,28 до 1,8. Дисперсия адекватности 0,078. Так как расчетное значение критерия Фишера (0,12) меньше табличного (3,05), то нулевая гипотеза о равенстве генеральных дисперсий принимается.

На рис. 1 представлена зависимость изменения оптической плотности от концентрации исследуемых ионов.

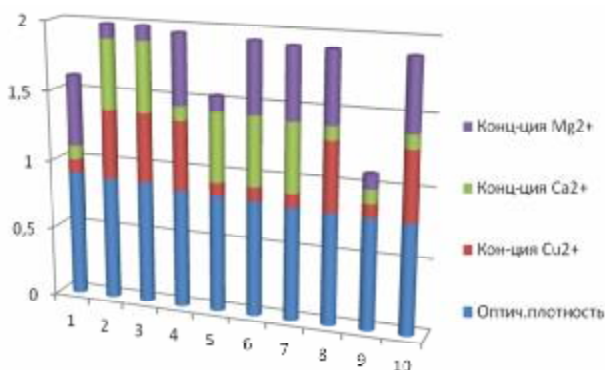


Рис. 1. Зависимость оптической плотности от концентрации исследуемых ионов

На графике можно проследить изменения показаний оптической плотности. Наибольшее значение достигается при максимальных концентрациях ионов магния и меди в рассматриваемом интервале.

На основании полученных данных и выведенной на графике зависимости, провели еще одну серию для более точного определения влияния факторов.

Исходя из данных первого эксперимента мы сузили интервал pH от 5 до 7, повысили концентрацию Ca^{2+} и Mg^{2+} от 0,5 мг/л до 1 мг/л и меди от 0,5 мг/л до 1 мг/л. Результаты измерений представлены на рис. 2.

Во втором эксперименте погрешность находится в пределах нормы, а именно не превышает единицу. Из приведенных данных следует, что наибольшее значение оптической плотности достигается при максимальной концентрации магния.

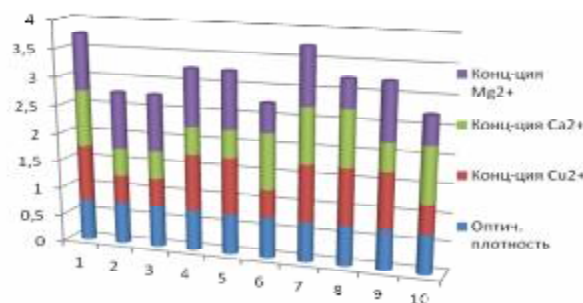


Рис. 2. Зависимости оптической плотности от концентрации исследуемых ионов

В третьем эксперименте мы решили сделать pH постоянным, так как при добавлении NH_4^+ медь и никель (неотъемлемый спутник меди) могут образовывать устойчивые комплексы $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]\text{Cl}_2$ ($K_{\text{уст.}} = 1 \cdot 10^{-12}$) и $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_2$ ($K_{\text{уст.}} = 1,02 \cdot 10^{-8}$). Возможно, наличие этих комплексов повлияло на значение оптической плотности. Без корректировки аммиаком был проведен следующий эксперимент. В третьем эксперименте значение погрешность также находится в пределах нормы и не превышает единицу. При постоянном pH, оптическая плотность не изменилась. Это говорит о том, что pH в заданном интервале не сказывалось на определении железа в воде.

В четвертой серии эксперимента мы отбросили первый фактор (pH), так как при его постоянном значении, показания оптической плотности не изменились. Сузили интервал концентрации для Ca^{2+} и Mg^{2+} от 0,5 мг/л до 0,8 мг/л, а интервал варьирования меди оставили без изменения, для более точного определения влияния кальция и магния. Рассчитанная погрешность в четвертом эксперименте находится в пределах нормы, не превышает единицу. По результатам четвертой серии выяснилось, что при изменении концентрации Ca^{2+} и Mg^{2+} изменение оптической плотности незначительное.

Так как Ca^{2+} и Mg^{2+} не оказывают значительного влияния на определение железа в исследуемом интервале мы взяли удобный нам интервал концентрации от 0,5 мг/л до 1 мг/л, и следующий шаг заключался в более точном исследовании влияния Cu^{2+} . Так как Ni^{2+} является сопутствующим ионом для Cu^{2+} , в следующей серии эксперимента определили влияние этого иона на определение железа. Исследуемый интервал находился в пределах от 0,3 мг/л до 0,5 мг/л для Cu и от 0,03 мг/л до 0,05 мг/л для Ni.

Результаты расчетов пятой серии эксперимента также находится в пределах нормы, не превышает единицу.

По показаниям оптической плотности можно сделать вывод, что именно медь значительно влияет на изменения оптической плотности, так как она при определенных концентрациях способна влиять на реакцию между роданидом и ионами трехвалентного железа [7]. Выяснив, что медь оказывает наибольшее влияние на определение железа, мы решили, выявив в каком интервале ее концентрации это влияние достигает максимума. Интервал исследования меди от 0,4 мг/л до 0,6 мг/л, никеля от 0,04 мг/л до 0,06 мг/л. (рис. 3).

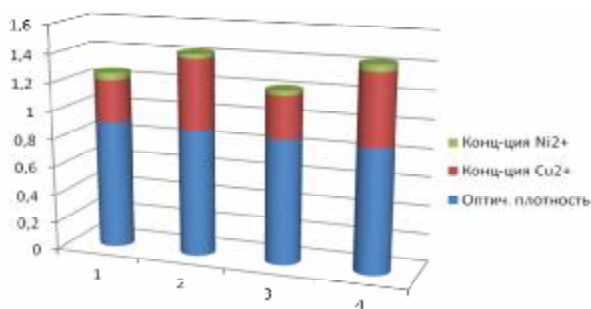


Рис. 3. Зависимость оптической плотности от концентрации исследуемых ионов в интервале исследования меди от 0,4 мг/л до 0,6 мг/л, никеля от 0,04 мг/л до 0,06 мг/л.

Руководствуясь данными, представленными на рис. 3 видно, что при увеличении концентрации меди увеличивается значение оптической плотности.

В седьмом эксперименте (рис. 4), был исследован еще один возможный интервал концентраций меди от 0,2 мг/л до 0,4 мг/л и никеля 0,02 мг/л до 0,04 мг/л.

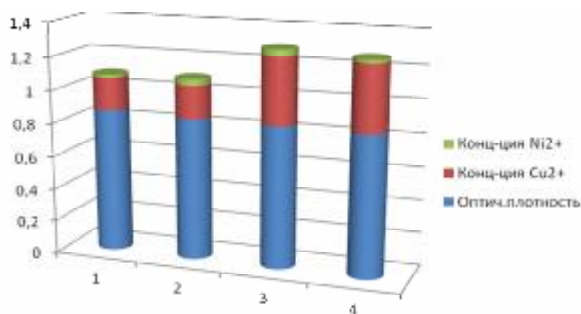


Рис. 4. Зависимость оптической плотности от концентрации исследуемых ионов в интервале концентраций меди от 0,2 мг/л до 0,4 мг/л и никеля 0,02 мг/л до 0,04 мг/л.

Исходя из графической зависимости, наибольшее значение оптической плотности достигалось при концентрации меди 0.5 мг/л.

В результате проведенного эксперимента мы можем сделать вывод, что наибольшее влияние на определения железа оказывают ионы меди. Присутствие ионов Cu^{2+} приводит к завышению значений оптической плотности. Наибольшее изменение показаний наблюдается при концентрации Cu^{2+} в интервале от 0,3 мг/л до 0.5 мг/л.

Выводы

Железо (III) в присутствии ионов меди, никеля, кальция, магния и различных значения pH определяли роданидным методом. Для количественной оценки 5-ти факторов на точность определения Fe^{3+} роданидным методом использовали полный факторный эксперимент.

В результате проделанной работы были выведены характеристические уравнения для каждой серии эксперимента, где x_1 - pH; x_2 - Cu^{2+} ; x_3 - Ca^{2+} ; x_4 - Mg^{2+} .

$Y_1 = 0.74 - 0.017x_1 - 0.0017x_2 + 0.011x_3 + 0.006x_4$ - если pH изменяется в интервале от 5 до 10 единиц pH, концентрация ионов Cu^{2+} от 0,1 мг/л до 0,5 мг/л; концентрацию Ca^{2+} и Mg^{2+} от 0,1 мг/л до 0,5 мг/л.

$Y_2 = 0.68 - 0.006x_1 - 0.005x_2 + 0.003x_3 + 0.016x_4$ - если pH изменяется в интервале от 5 до 7 единиц pH, концентрация ионов Cu^{2+} от 0,5 мг/л до 1 мг/л; концентрацию Ca^{2+} и Mg^{2+} от 0,5 мг/л до 1 мг/л.

$Y_3 = 0.7 - 0.0019x_1 + 0.0011x_2 + 0.01x_3 + 0.005x_4$ - если pH сделать постоянным = 3 единицам pH, изменить концентрацию ионов Cu^{2+} от 0,5 мг/л до 1 мг/л; концентрацию Ca^{2+} и Mg^{2+} от 0,5 мг/л до 1 мг/л.

$Y_4 = 0.65 - 0.01x_1 + 0.003x_2 + 0.01x_3 - 0.005x_4$ - если концентрация ионов Cu^{2+} изменяется в интервале от 0,5 мг/л до 0,8 мг/л; концентрация Ca^{2+} и Mg^{2+} от 0,1 мг/л до 0,5 мг/л.

В пятой, шестой и седьмой серии эксперимента было исследовано влияние меди и никеля, где x_1 - Cu^{2+} ; x_2 - Ni^{2+} . В результате трех серий эксперимента можно вывести общее характеристическое уравнение:

$$Y = 0.87 - 0.0038x_1 + 0.003x_2$$

В трех последних сериях эксперимента было исследовано влияние концентрации ионов Cu^{2+} в интервале от 0,2 мг/л до 0,5 мг/л и Ni^{2+} в интервале от 0,02 мг/л до 0,05 мг/л.

Коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов. Если коэффициент имеет знак плюс, то с увеличением значения фактора влияние на определение железа увеличится, а если минус, то уменьшается.

Величина коэффициента соответствует вкладу данного фактора в точность определения железа.

Под влиянием исследуемых факторов показателя оптической плотности завышаются на 16,7 % относительно стандартного значения: стандартное значение = 0,778, а полученное максимальное значение 0,908.

Список литературы

1. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.1.4.1074-01. – М.: изд-во Стандартов, 2001.
2. Водный кодекс Российской Федерации от 3 июня 2006 г. N 74-ФЗ. – М.: изд-во Стандартов, 2006.
3. ГОСТ 25151-82: Водоснабжение. Термины и определения. – М.: изд-во Стандартов. 1982, – 55 с.
4. Магдыч Е.А. Анализ показателей качества питьевой воды районов города Севастополя / Е.А. Магдыч, Т.Н. Замыслова, С.А. Федорова, Е.А. Радченко // Сб. науч. тр. СКУЯЭиП. – Севастополь: СКУЯЭиП, 2012. – Вып. 3(43). – С. 86 - 90.
5. Золотов Ю.А. Основы аналитической химии / Ю.А. Золотов. – М.: Высшая школа, 2001. – 257 с.
6. Водоподготовка /под ред. Беликова С.Е. – М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с.
7. Федорова С.А. Использование факторного анализа для анализа факторов, влияющих на содержания железа в питьевой воде / С.А. Федорова, Д.И. Безбородова // Тезисы всеукраинской конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности», Севастополь, 23 мая 2014 г. – Севастополь: СКУЯЭиП, 2014. – С. 23.

References

1. *Sanitarno-ehpidemiologicheskie pravila i normativy. SanPiN* [Sanitary-epidemiological rules and norms. SanPiN 2.1.4.1074-01.]. Moskow, Standartinform Publ., 2006.
2. *Vodnyj kodeks Rossijskoj Federacii ot 3 iyunya 2006 g.* [Water Code of the Russian Federation from June, 3rd, 2006 N 74-FZ]. Moskow, Standartinform Publ., 2006.
3. *GOST 25151-82: Vodosnabzhenie. Terminy i opredeleniya* [State Standard 25151-82: Water. Terms and Definitions]. Moskow, Standartinform Publ., 1982. 55 p.
4. Magdych E.A., Zamysova T.N., Fedorova S.A., Radchenko E.A. Analysis of the quality of drinking water of Sevastopol city. *Sbornik nauchnyh trudov Sevastopol'skogo nacional'nogo universiteta yadernoj ehnergii i promyshlennosti*, 2012, No. 3(43), pp. 86 - 90.
5. Zolotov Y. *Osnovy analiticheskoy khimii* [Fundamentals of Analytical Chemistry]. Moskov, High school, 2001. – 257 p.

6. *Vodopodgotovka* [Water conditioning] ed. Belikov S.E.. Moskow, Akva-Term, 2007, 240 p.
7. Fedorova S.A., Bezborodova D.I. Using factor analysis to analyze the factors affecting the content of iron in drinking water. *Tezisy Vseukrainskoj konferencii «Aktual'nye voprosy yadernohimicheskikh tekhnologij i ehkologicheskoy bezopasnosti»*, Sevastopol', SNUNE&I Publ., 2014. p. 23

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

УДК 634.0.813.11

Изучение механизма процессов сорбции радионуклидов на ионообменных лигниновых сорбентах

В.А. Ерофеев¹, Н.И. Черкашина², Д.Ю. Сулавко³, Э.А. Культенко⁴
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹vaerofeev@mail.ru, ²selyanskij-as@ya.ru,
³darya84_27@mail.ru, ⁴kultenkoe@mail.ru

Статья поступила 13.05.2016 г.; после доработки 15.05.2016 г.

Аннотация

Рассмотрены основные эффекты, влияющие на кинетику ионного обмена лигниновых сорбентов типа «Фо-лиокс КГМ». При использовании метода равновесно-кинетического анализа и результатов эксперимента подтверждена ранее описанная приближенная внутридиффузионная модель характера сорбции некоторых радионуклидов из водных растворов лигниновыми сорбентами.

Найденные кинетические параметры взаимодействия лигнинового сорбента с катионами металлов необходимо использовать при прогнозировании технологических процессов сорбции в системах очистки жидких радиоактивных отходов от основных радионуклидов.

Ключевые слова: сорбент лигниновый, сорбция-десорбция, анализ кинетический, внутридиффузионная модель, кинетические параметры сорбции

Studying of the Mechanism of Processes of a Sorption of Radionuclides on Ion-exchange Lignin Sorbents

V.A. Erofeev¹, N.I. Cherkashina², D.Y. Sulavko³, E.A. Kulenko⁴
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia
¹vaerofeev@mail.ru, ²selyanskij-as@ya.ru, ³darya84_27@mail.ru, ⁴kultenkoe@mail.ru

Received 13.05.2016 y.; received in final form 15.05.2016 y.

Abstract

Describes the main effects influencing the kinetics of ion exchange lignin sorbent "Felix KGM". When using the method of equilibrium-kinetic analysis and the results of the experiment confirmed earlier described close equilibrium model of sorption of some radionuclides from aqueous solutions lignin sorbents.

Found kinetic parameters lignin interaction of the sorbent with cation metal for metal you must use in forecasting of technological processes of sorption in the system Mach purification of liquid radioactive waste from the main radionuclides.

Keywords: the sorbent is lignin, a sorption desorption, the analysis kinetic, intra diffusion model.

Введение

При эксплуатации энергоблоков АЭС и, особенно при их выводе из эксплуатации, значительно возрастает спрос на эффективные средств-

ва очистки технологических сред и образующихся в больших объемах жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) от радионуклидов и вредных примесей.

Удаление радионуклидов и других загрязнителей из вод душевых, спецпрачечных и дезактивационных вод до сбросовых санитарных норм является одной из актуальных задач и может быть решена при использовании энергосберегающих и достаточно эффективных ионообменных технологий с использованием природных сорбентов.

В этой связи, лигнинсодержащие материалы как сорбенты и ионообменники могут сыграть важную роль при решении задач очистки воды от вредных примесей и дезактивации технологических сред и радиоактивных отходов (РАО) от радионуклидов. Ионный обмен на лигниновых сорбентах характеризуется рядом особенностей, поэтому использование известных математических моделей для описания и расчета ионообменных процессов на лигниновых материалах осложнено.

Тем не менее, нами на конкретных примерах, используя статические методы анализа, показана возможность использования некоторых существующих моделей, которые удовлетворительно объясняют кинетику ионообменных процессов, реализуемых на лигнинах, если сорбция исследуемого компонента описывается линейной или близкой к линейной изотермой.

Учитывая, что лигниновые сорбенты являются трехмерными полимерами нерегулярной структуры, то заметное влияние на процесс ионного обмена будут играть внешне- и внутридиффузионные факторы процесса.

Моделирование процессов диффузии компонента во внутрь зерна будет ограничиваться рассмотрением двух видов взаимодействия: сорбция-десорбция. Однако эта модель в полном объеме применима лишь для однозарядных ионов и других компонентов, не имеющих электростатический заряд, так как установлено, что многозарядные ионы практически не участвуют в процессах десорбции, так как в результате хемосорбции они образуют прочные хелатные соединения с активными группами находящихся в структуре сорбента. [1]

Для выявления механизма осаждения радионуклидов, например, Cs, Rb, Sr и другие из технологических сред целесообразно использовать метод равновесно-кинетического анализа, который позволил бы получить равновесную и кинетическую информацию из единой серии обычных временных экспериментов, без достижения равновесия и, при необходимости, соблюдения постоянства параметров на начальной стадии процесса. [2]

Использование равновесно-кинетического анализа (РКА) дает возможность находить модельные величины термодинамических и кинетических констант по отношению к конкретному химическому процессу. Поэтому метод РКА дает оценку адекватности только диффузионных моделей. В этом случае внешние или внутренние диффузионные процессы сорбции необходимо представить как лимитирующую стадию процесса, которая локализуется на границе раздела фаз сорбент-раствор, поэтому перепад концентрации (основная движущая сила диффузии) будет реализовываться в тонкой пленке на границе раздела этих фаз или внутри зерна сорбента.

В ионообменных сорбционных процессах при выборе математической модели необходимо учитывать влияние электрического поля ионов на внутреннюю диффузию в ионитах. [3]

Данное обстоятельство связано, в первую очередь, с тем, что влияние электрического поля ионов на ионный обмен является важным, но не единственным фактором, который необходимо учитывать наряду с набухаемостью при выборе уравнения, описывающего кинетику ионного обмена на лигниновых сорбентах. [4]

Известно, что в первом приближении эффект набухания приводит к дополнительной зависимости коэффициента внутренней диффузии от концентрации противоионов. [5]

Учитывая приведенные доводы, наиболее приемлемой, на наш взгляд, для описания механизма процессов сорбции и десорбции на лигниновых сорбентах, является нелинейная феноменологическая модель внутренней диффузии в ионите с переменным, зависящим от концентрации, коэффициентом диффузии $D_{эф}$.

Зависимость коэффициента $D_{эф}$ от концентрации сорбируемого иона будет определяться из экспериментальных данных.

Постановка цели научной работы

Целью данной работы является определение кинетических характеристик сорбции в различных по составу радиоактивных средах. На основании статического метода анализа, дающего возможность определить лимитирующую стадию процесса сорбции, выбрать наиболее приемлемую математическую модель, с достаточной вероятностью описывающую кинетику процессов сорбции радионуклидов на лигниновых сорбентах.

Разработка математической модели и кинетических параметров сорбции

Для оценки адекватности механизма и кинетических параметров сорбции нами использовался метод, основанный на связи динамики заполнения емкости сорбента (F) и времени сорбции (t), а также равновесно-кинетический анализ процессов сорбции [2].

При соблюдении всех условий проведения опытов, результатами модельной обработки экспериментальных данных являются конкретные числовые значения константы скоростей реакции, коэффициенты диффузии при различных температурах, энергия активации в рамках выбранной модели, изменения стандартных термодинамических функций в настоящем процессе и коэффициенты корреляции.

При выборе лимитирующего характера диффузионных процессов сорбции на лигниновых сорбентах необходимо было определить критерии БиоН-параметр, который характеризует относительный вклад внешней и внутренней диффузии. Если $N > 100$, то определяющей стадией является внутридиффузионная кинетика, если $N < 1$ – внешнедиффузионная кинетика, если $1 > N > 100$ – смешанно-диффузионная кинетика. [6]

В результате вычислений и комплексной обработки результатов равновесно-кинетического анализа было установлено, что основной лимитирующей стадией сорбции-десорбции будет внутридиффузионная кинетика процесса, поэтому в качестве $D_{эф}$ с некоторыми допущениями будет выступать коэффициент внутренней диффузии, который наиболее точно может определить из классического уравнения внутренней диффузии для частиц сорбента. [7]

$$F = 1 - \frac{6}{q \cdot p^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot e^{-\frac{D_a \cdot n^2 \cdot p^2 \cdot t}{\left(\frac{d_3}{z}\right)^2 \cdot q^2}},$$

где F – степень заполнения емкости сорбента;

$D_{эф}$ – эффективный коэффициент внутренней диффузии;

t – время достижения степени заполнения емкости сорбента;

$d_{эф}$ – эффективный размер частиц сорбента;

q – изменение объема сорбента при набухании.

Эффективный диаметр частиц сорбента определяют через основные характеристики зернистого материала по формуле

$$d_{эф} = 4\varepsilon_0/\alpha, \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = (V - V_\tau)/V = V_0/V,$$

где α – удельная поверхность сорбента;

V – общий объем, занимаемый зернистым слоем;

V_0 – свободный объем слоя;

V_τ – объем, занимаемый частицами, образующими слой.

Таким образом, в общем Сиде феноменологическая нелинейная модель внутренней диффузии в лигниновом сорбенте с переменным, зависящем от концентрации, эффективным коэффициентом внутренней диффузии $D_{эф}$ будет иметь вид:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \text{div}[D_{эф}(a)\text{grad}(a)], \quad (2)$$

где $a(x,y,z,t)$ – локальная концентрация сорбируемого (десорбируемого) иона в точке среды (x,y,z) в момент времени t ;

$D_{эф}(a)$ – переменный эффективный коэффициент внутренней диффузии.

Исходя из представленного уравнения (2), нами сформулированы условия и ограничения в экспериментах и расчетах внутридиффузионной кинетики сорбции и десорбции. Учитывая, что поверхность лигниновых сорбентов имеет достаточно полную и достоверную характеристику, то для простоты расчетов мы вводим ограничения и в дальнейшем будет использовать одномерные модели указанных процессов, а конкретно, будем использовать зерна сорбента фракции 0,35...0,85 мм (0,35 – 50 %, 0,36...0,75 – 30 %, 0,76...0,85 – 20 %) неправильной формы. Толщина зерна (наибольшая) $2b$, где координата $x = b$ соответствует его центру. Характер поверхности зерна сорбента может меняться при изменении молекулярной массы полимера, поэтому надмолекулярная структура будет оказывать влияние на микропористость.

При соблюдении всех условий проведения опытов (особенно принципиальной достижимости системой равновесного состояния) результатами модельной обработки экспериментальных данных будут конкретные числовые значения константы скоростей реакции, коэффициенты диффузии при различных температурах; энергия активации в рамках принятой модели, равновесные модельные концентрации компонентов и констант равновесия для каждой кинетической кривой и коэффициенты корреляции.

Определение кинетических параметров сорбции (ионного обмена)

Исследованию был подвергнут лигниновый сорбент (на основе плодовой косточки) после

механо-химической обработки по методике [8] и классифицирован согласно принятым условиям проведения экспериментов.

В дальнейшем косточковый лигнинный сорбент обозначен согласно торговой марки ФолиоКС КГМ (косточковый гранулированный модифицированный), который соответствует ТУ на товарный продукт (гранулометрический состав, удельный объем, ПСОЕ (полная статическая объемная емкость), химическая и термическая устойчивость и др.).

Для определения кинетических параметров сорбции на сорбенте ФолиоКС КГМ использовали растворы, содержащие ионы Cs^+ , Sr^{2+} в пределах концентраций примесей от 0,5 до 5 г/дм³, температурные интервалы исследований коэффициента диффузии Д 25...45...60 °С.

Модельную полную статическую обменную емкость (ПСОЕ) лигнинного сорбента определяли исходя из расчета общих гидроксидов по формуле [9]

$$\sum_{\text{ОН}}^{\text{COOH}} = \frac{25\text{H}[\text{Ba}(\text{OH})_2] + 12,52\text{H}(\text{HCl})a\text{H}\text{Ba}(\text{OH})_2}{A[100 - (W + 3)]} \cdot 10C, \text{ мг} \cdot \text{экв/г}, \quad (3)$$

где a – количество мл $\text{Ba}(\text{OH})_2$, пошедшее на обратное титрование; A – навеска лигнинного сорбента (сухого), г; W – влажность лигнинного сорбента, %; 3 – зольность лигнинного сорбента, %.

С целью определения общего количества функциональных групп $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$ (фенольные), определяющих модельную ПСОЕ, функциональный анализ проводили по методикам [9].

Экспериментальная статическая обменная емкость (ПСОЕ) лигнинного сорбента A (мг-экв/г) вычислялась на основании экспериментальных данных по формуле [10]

$$A = \frac{C_0 - C}{m} \cdot V,$$

где C_0 и C – исходная и конечная концентрация в растворе моль/дм³; V – объем раствора, дм³; m – масса навески лигнинного сорбента, г.

Общий порядок расчета по уравнению (2) состоит в следующем: каждая кинетическая кривая сорбции представляется набором их по методу равновесно-кинетического анализа точечные значения продолжительности процесса используются непосредственно, а текущая концентрация C пересчитывается $(z - z_0)$ по выражениям:

$$Z - z_0 = nt; \quad (4)$$

$$z_0 = \ln A. \quad (5)$$

В этом случае необходимо ввести количественный учет случайных и регулярных отклонений в экспериментальных данных, в особенно-

сти это относится к нарушениям изотермичности или нестационарности режима перемешиваемости в начальной стадии процесса.

Модельная формально-кинетическая продолжительность процесса t будет складываться из фактической (экспериментальной) t_0 и поправочной Δt , поэтому вместо выражения (4) получаем:

$$(z - z_0) = n(t_0 + \Delta t)$$

или

$$(z - z_0) = nt_0 + n\Delta t. \quad (6)$$

По уравнению (6) каждая кинетическая кривая сорбции состоит из набора экспериментальных массивов t и C . Для обработки экспериментальных данных по методу экспериментально-кинетического анализа точечные значения продолжительности процесса используются непосредственно, а текущая концентрация C пересчитывается на $(z - z_0)$ по выражениям (4) и (5).

При этом, возникает необходимость определения точного значения равновесной концентрации металла в сорбенте, соответствующей полной статической обменной емкости (ПСОЕ). Для этого в расчетах по каждой кинетической кривой в уравнении (3) задается первое поисковое значение ПСОЕ, например, заведомо меньше экспериментальной равновесной концентрации, затем рассчитывается $(z - z_0)$ и далее по методу наименьших квадратов вычисляется n и $n\Delta t$, по которым определяются расчетные значения $(z - z_0)_p$, которые затем сравниваются с $(z - z_0)$ по величине коэффициента корреляции, справедливого для линейных многофакторных зависимостей

$$\frac{dF}{A - BF} = ndt,$$

где $F = \frac{C}{\text{ПСОЕ}}$ – степень насыщения сорбента;

ПСОЕ – полная статическая емкость сорбента (экспериментальная)

$$A = \frac{\bar{C}_0}{\text{ПСОЕ}}; B = \left(\frac{m_0}{W} + 1 \right); n = \frac{3m_0}{r_0 \cdot \rho} \cdot \frac{D}{\delta},$$

где D – коэффициент внешней диффузии;

ρ – плотность сорбента;

δ – толщина диффузионного слоя.

При исследовании адсорбции компонентов раствора при равновесно-обратном процессе определялись термодинамические характеристики адсорбции (ТХА) по методике [12], для чего использовались стандартные термодинамические уравнения.

Энтальпия ΔH и константа равновесия адсорбции k_a связаны уравнением Вант-Гоффа

$$\frac{d \ln k_a}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2}, \quad (7)$$

где k_a – константа адсорбции;

T – температура, К;

ΔH – энтальпия адсорбции, Дж/моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К.

Если предположить, что ΔH не зависит от температуры, то уравнение (7) можно преобразовать (13):

$$\lg k_a = -\frac{\Delta H}{2,30259 \cdot RT} + \text{const},$$

которое можно использовать для расчета ΔH из экспериментальных данных:

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T}.$$

Свободную энергию Гиббса вычисляют по изотерме адсорбции:

$$\Delta G = -RT \ln k_a$$

Экспериментальная часть

Для изучения кинетики и термодинамики адсорбционных и ионообменных процессов на лигниновых материалах в условиях обращено-фазовой хроматографии была проведена серия опытов при различных составах подвижной фазы. В качестве подвижной фазы использовали растворы CsNO_3 ; $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ в концентрациях 0,5...5,0 г/дм³, pH = 6...7, температурные интервалы исследований 298 – 333 К, скорость подвижной фазы составляет 1 – 2 мл/см³, хроматографическая колонка $d = 15$ мм, высота слоя сорбента $h = 100$ мм.

Для определения статических параметров (экспериментальная ПСОЕ) брали навески по 1 г с точностью до 0,0001 г, предварительно взвешенных до постоянного веса, помещали в стакан емкостью 50 мл, куда добавляли растворы приготовленных солей, объемом 25 мл, который перемешивали на магнитной мешалке. Экспериментальные данные статических параметров адсорбционных и ионообменных процессов контролировались на атомно-адсорбционном спектрофотометре (ААС) «Сатурн-4ЭПАВ» с электротермическим и пламенным анализатором. Результаты обрабатывали на ПЭВМ «AnLab», которые приведены на рис. 1 и 2.

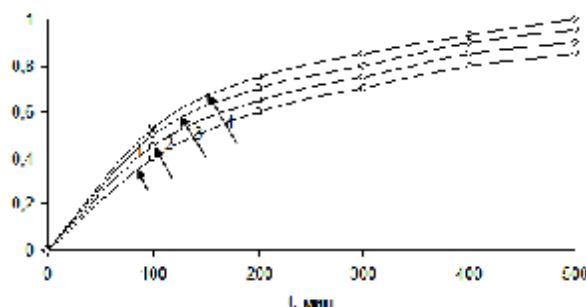


Рис. 1. Зависимость степени заполнения емкости сорбента «Фолиоокс-КМГ» при различных концентрациях CsNO_3 : 1...0,5 г/дм³; 2...1,0 г/дм³; 3...2 г/дм³; 4...5 г/дм³

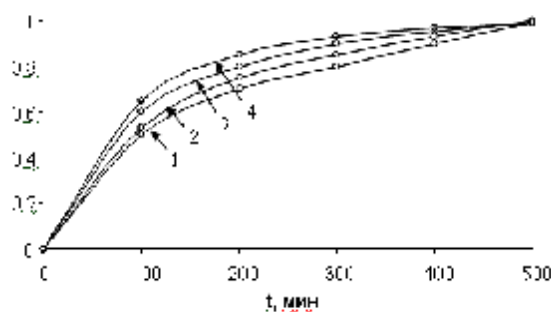


Рис. 2. Зависимость степени заполнения емкости сорбента «Фолиоокс КМГ» при различных концентрациях $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$: 1...0,5 г/дм³; 2...1,0 г/дм³; 3...2 г/дм³; 4...5 г/дм³

Данные величины предельной адсорбции сорбента «Фолиоокс КМГ» приведены в таблице 1.

Таблица 1. Величина предельной адсорбции сорбента «Фолиоокс КМГ»

№ п/п	Образцы	№ опытов	Масса образца, м, г	Величина предельной адсорбции (мг/г)
1	Раствор CsNO_3 (1 г/дм ³)	1	1,0009	4,90
		2	1,0001	4,43
		3	0,9999	4,07
2	Раствор $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ (1 г/дм ³)	1	1,0004	5,45
		2	1,0002	5,41
		3	1,0001	5,33

В целях изучения термодинамики адсорбционных процессов в условиях обращено-фазовой хроматографии и получения исходных данных для расчета термодинамических величин использовали хроматограф «Милихром А-02» с ультрафиолетовым детектором, позволяющим осуществлять многоволновое детектирование в области 190...360 нм, и при использовании термостата, обеспечивающего термостатирование колонок при температуре в диапазоне 308... 363 К, в ка-

честве объекта исследования выбраны образцы растворов CsNO_3 и $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ в концентрациях $1,0 \text{ г/дм}^3$.

Для определения термодинамических характеристик адсорбции (ТХА) детектирование проводили на длинах волн 230, 250, 300 и 360 нм. Все

расчеты осуществляли по данным, полученным при $\lambda = 360 \text{ нм}$.

Расчетные термодинамические параметры сорбции ионов Cs^+ и Sr^{2+} ($C = 100 \text{ мг/дм}^3$) на лигниновом сорбенте приведены в таблице 2.

Таблица 2. Термодинамические параметры сорбции ионов Cs^+ и Sr^{2+} на ионите «Фолиоокс КГМ»

Ион	№№ опыта	ΔH , кДж/К·моль	ΔS , кДж/К·моль	ΔG , кДж/К·моль			
				320	330	340	350
Cs^+	1	3745	0,064	-14,7	-14,9	-15,0	-15,3
	2	3816	0,059	-14,6	-14,9	-15,1	-15,4
	3	3790	0,061	-14,6	-14,8	-15,0	-15,4
Sr^{2+}	1	4050	0,059	-13,1	-13,4	-13,9	-14,5
	2	4048	0,065	-13,0	-13,3	-14,0	-14,3
	3	4017	0,063	-13,1	-13,3	-14,0	-14,5

Обсуждение результатов

По кинетическим характеристикам можно сделать выводы, что выбранная внутридиффузная модель обеспечивает энергии активации, которые согласуются с расчетными значениями констант скорости сорбции при различных температурах. Все полученные значения теплот адсорбции отрицательны, что, как и предполагалось, является экзотермическим процессом.

На рис. 3 представлены зависимости локальная концентрация сорбируемых ионов Cs^+ и Sr^{2+} лигниновым сорбентом «Фолиоокс КГМ» в точке среды (x, y, z) в момент времени t .

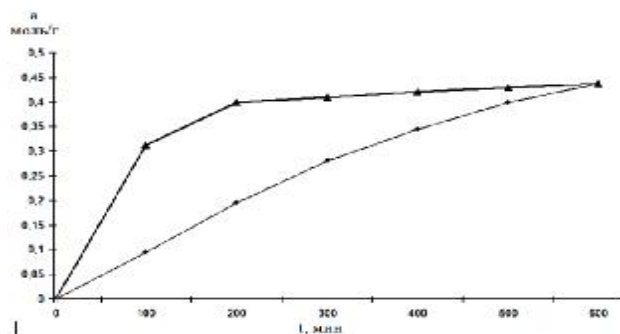


Рис. 3. Интегральные кинетические кривые сорбции ионов Cs^+ и Sr^{2+} лигниновым сорбентом «Фолиоокс КГМ»: $C_{\text{Me}} = 2 \text{ ммоль/дм}^3$, $t = 22 + 0,5^\circ\text{C}$, $V/g = 0,3 \text{ дм}^3/\text{г}$, $\text{pH} = 6$, $\blacktriangle$ - Sr^{2+} ; $\blacksquare$ - Cs^+

На рис. 4 представлены зависимости $\ln k_p$ от температуры при сорбции Cs и Sr лигниновым сорбентом «Фолиоокс КГМ».

Суммарная концентрация ионов стронция и цезия составляла $C = 200 \text{ мг/дм}^3$, температурные интервалы исследований $298 - 333 \text{ К}$, хроматографическая колонка $d = 15 \text{ мм}$, высота слоя

сорбента $h = 100 \text{ мм}$, $\text{pH} = 6...7$, скорость подвижной фазы составляет $1 - 2 \text{ мл/см}^3$.

Из зависимости $\ln k_p$ от величины обратной температуре ($1/T$) для исходной концентрации (Cs и Sr) $C = 100 \text{ мг/дм}^3$, где k_p – коэффициент распределения

$$\ln k_p = \Delta S/R - \Delta H/RT$$

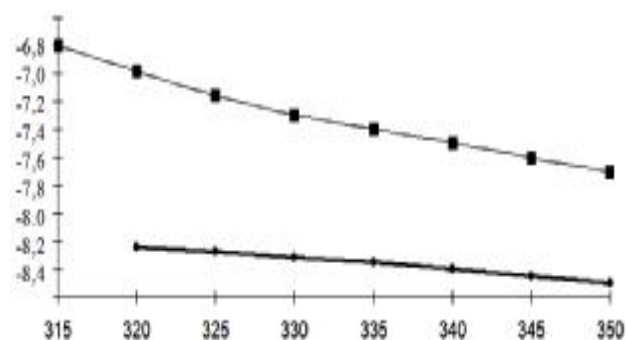


Рис. 4. Зависимость $\ln k_p$ от температуры при сорбции Cs и Sr ($C = 100 \text{ мг/дм}^3$) на лигниновом сорбенте
 $\blacksquare$ - Sr ; $\blacktriangle$ - Cs

Необходимо учитывать при выборе модели сорбции, что сорбция ионов тяжелых металлов может протекать по нескольким механизмам [13]:

1) ионному обмену;

2) образование хелатных комплексов с поверхностными гидроксигруппами фрагментов макромолекулы лигнина.

Приведены результаты сравнений внешнедиффузионной и внутридиффузионной модели по экспериментальной и модельной ПСОЕ, мг/г , температурные интервалы выбраны в пределах $298... 333 \text{ К}$, K_0 в зависимости от температуры от $(7,995 - 11,994) \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ для внешнедиффузионной модели и от $(2,783 - 3,989) \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{с}$ для внутридиффузионной модели.

При использовании внутридиффузионной модели получены наиболее адекватные результаты по модельным равновесным значениям емкости металлов в сорбенте (ПСОЕ) с экспериментальными данными.

Результаты равновесно-кинетического анализа сорбции цезия и стронция лигниновыми сорбентами «Фолиоокс КГМ» приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты равновесно-кинетического анализа сорбции цезия и стронция лигниновыми сорбентами

Внешне-диффузионная модель									
№ пп	Тип ком- плекса	Темпе- ратура, К	R	t _r	Δt, мин	Модельная ПСОЕ, мг/г	Эксперимен- тальная ПСОЕ, мг/г	K ₀ ·10 ⁻⁷ , см ² /с	E, кДж/ моль
1	LiqCs	293	0,8094	5,25	2345	4,86	4,90	7,995	
		313	0,8004	3,41	2213	4,64	4,43	9,428	
		333	0,7998	3,74	2062	4,46	4,07	10,809	7,59
2	Liq ₂ Sr	293	0,7934	5,35	1842	4,85	5,45	7,893	
		313	0,7841	4,56	1899	3,87	4,99	9,459	
		333	0,7850	4,13	2254	2,95	4,01	11,994	8,37
Внутридиффузионная модель									
3	LiqCs	293	0,9806	96,1	-55,49	4,81	4,90	2,783	
		313	0,9462	37,8	-47,80	4,39	4,43	3,469	
		333	0,9736	101,5	+4,40	4,18	4,07	4,511	9,82
4	Liq ₂ Sr	293	0,9698	49,6	-56,42	5,01	5,45	2,827	
		313	0,9802	56,4	-58,4	4,86	5,41	3,558	
		333	0,9841	53,3	-16,62	4,01	5,33	3,989	10,78

По приведенным кинетическим характеристикам и термодинамическим параметрам можно сделать вывод, что выбранная модель обеспечивает значения энергий активации, которые практически не отличаются от рассчитанных по константам скорости сорбции при различных температурах, что подтверждает внутридиффузионную модель сорбции Cs⁺ и Sr²⁺ на лигниновых сорбентах.

Обсчет экспериментальных данных по уравнениям внешнедиффузионной модели дает невероятные значения величин Δt , сравнимых с общей продолжительностью процесса сорбции. Наибольшее значение величины t также свидетельствует об отсутствии тесной связи расчетных и экспериментальных данных.

Выводы

Таким образом, на основании вычислений и комплексной обработки результатов равновесно-кинетического анализа подтверждена, ранее высказанная концепция о том, что основной лимитирующей стадией сорбция-десорбция катионов металлов на лигниновых сорбентах будет преобладать внутридиффузионная кинетическая модель процесса. [14]

Найденные кинетические параметры процесса сорбционного взаимодействия катионов Cs⁺ и Sr²⁺ с лигниновым сорбентом «Фолиоокс

КГМ» будут использованы в прогнозировании технологических процессов при расчете расхода сорбента для эффективного извлечения радионуклидов из технологических сред и ЖРО, а также для расчета технологических параметров средств очистки и интенсификации ее работы.

Список литературы

1. Ерофеев В.А. Физико-химическая модель взаимодействия препаратов лигнина в процессах очистки ЖРО / В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина, Э.А. Культенко // Экология и развитие общества, 2015. – Вып. 2(13). – С. 23 - 27.
2. Груздева А.Н. О теоретическом описании процессов внутридиффузионной сорбции и десорбции в ионообменных сорбентах / А.Н. Груздева, Р.Х. Хамизов, П.П. Золотарев // Сорбционные и хроматографические процессы, 2008. – Т. 8. – Вып. 1. – С. 99
3. Кокотов Ю.А. Теоретические основы ионного обмена: сложные ионообменные системы / Ю.А. Кокотов, П.П. Золотарев, Г.Э. Елькин. – Л.: Химия, 1986. – 280 с.
4. Кокотов Ю.А. Равновесие и кинетика ионного обмена / Ю.А. Кокотов, Пасечник В.А. – Л.: Химия, 1970. – 331 с.
5. Черкашина Н.И. Кинетика сорбции радионуклидов при различных концентрациях органических и неорганических примесей / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев, А.В. Васина // Сб. науч. тр. СТУЭЭиП. – Севастополь: СТУЭЭиП, 2011. – Вып. 4(40). – С. 180 - 184.

6. Котова Д.Л. Кинетика сорбции аминокислот на сульфокатионите КУ-2-8 при различных температурах / Д.Л. Котова, Т.А. Крысанова, О.И. Рожнова, В.Ф. Семенов // Вестник ВГУ, 2003. – Вып. 2. – С. 35 - 37.
7. Пат. 93844 Украина МПК⁵ БОИ 20/30 C02F 1/28/ Способ получения косточкового порошкового модифицированного сорбента «Фолиоокс КГМ» / Ерофеев В.А., Пилипченко И.И., Черкашина Н.И.; заявитель и патентообладатель СНУЭИП. – На 2010011280, заявл.13.04.2010, опубл. 10.03.2011. Бюл. № 5. – 4 с.
8. Закис Г.Ф. Химия и использование лигнина / Г.Ф. Закис. – Рига: Зинатне, 1987. – 230 с.
9. Курмышева А.Ю. Термодинамические и кинетические процессы молибдат ионов на оксиде алюминия / А.Ю. Курмышева, Е.В.Сотникова, Е.О. Забенькина, М.Ю. Житков // Сорбционные и хроматографические процессы, 2014. – Т. 14. – Вып. 2. – С. 303 - 311.
10. Пименова Л.А. Исследование кинетики сорбции и механизма взаимодействия ионов Cu^{2+} , Ba^{2+} , Y^{3+} в фазе карбоксильного катионита КБ-4ПХч / Л.А. Пименова, Е.Л. Нестерова // Фундаментальные исследования, 2008. – Вып. 4. – С. 24 - 28.
11. Алосмапов Р.М. Исследование кинетики сорбции Со и Ni фосфорсодержащим катионитом / Р.М. Алосмапов //Сорбционные и хроматографические процессы, 2010. – Т. 10. – Вып. 3. – С. 427 - 435.
12. Шафигулина А.Д. Определение термодинамических характеристик адсорбции наночастиц серебра в условиях обращено-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии / А.Д. Шафигулина [и др.] // Сорбционные и хроматографические процессы, 2013. – Т. 13. – Вып. 6. – С. 920 - 927.
13. Ерофеев В.А. Физико-химическая модель взаимодействия препаратов лигнина в процессах очистки ЖРО / В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина, Э.А. Кульченко // Экология и развитие общества, 2015. – Вып. 2(13). – С. 23 - 28.
4. Kokotov Yu.A., Bee-keeper of V.A. *Ravnovesie i kinetika ionnogo obmena* [Equilibrium and kinetics of an ionic exchange]. Leningrad, Chemistry, 1970, 331 p.
5. Cherkashina N.I., Erofeyev V.A., Vasina A.V. A kinetics of a sorption of radionuclides at various concentration of organic and inorganic impurity *Sbornik nauchnyh trudov SNUNE&I*, 2011, No. 4(40), pp. 180-184.
6. Kotova D.L., Krysanov T.A., Rozhnov O.I., Semenev V.F. A kinetics of a sorption of amino acids on KU-2-8 sulfocation exchanger at various temperatures *Vestnik VGU*, 2003, No. 2, pp. 35-37.
7. Erofeev V.A., Pilipchenko I.I., Cherkashina N.I. *Sposob polucheniay kostochkovogo poroshkovogo modifitsirovannogo sorbenta «Folioks KGM»* [Way of receiving a kostochkovy powder modified sorbent "Folioks KGM"]. Patent 93844 Ukraine MPK5 BOIJ 20/30 C02F 1/28/ Zayavitel and the patent holder SNUNEI – Na 2010011280, zayav l.13.04.2010,10.03.2011. Bulletin No. 5.
8. Zakis G. F. *Khimiya i ispol'zovanie lignina* [Chemistry and utilization of lignin]. Riga, Zinatne, 1987, 230 p.
9. Kurmysheva A.Yu., E.V. Sotnikova, E.O. Zabenkina, Zhitkov M.Yu. Thermodynamic and kinetic processes a molybdate of ions on adamant *Sorbcionnye i Hromatograficheskie processy*, 2014, T. 14, Vol. 2, pp. 303-311.
10. Pimenova L.A., Nesterov E.L. Research of a kinetics of a sorption and the mechanism of interaction of ions Cu^{2+} , Ba^{2+} , Y^{3+} in a phase of the CB-4PHch carboxylic cation exchanger. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2008, Vol. 4, pp. 24-28.
11. Alosmapov R.M. Research of a kinetics of a sorption With and Ni fosoforsoderzhashchy cation exchanger. *Sorbcionnye i Hromatograficheskie processy*, 2010, T. 10, Vol. 3, pp. 427-435.
12. Shafigulina A.D., Larionov O.G., Revina A.A., Ponomarev K.V., Larionova A.O. Definition of thermodynamic characteristics of adsorption of nanoparticles of silver in conditions is turned - phase high performance solution chromatography. *Sorbcionnye i Hromatograficheskie processy*, 2013, T. 13, Vol. 6, pp. 920-927.
13. Erofeyev V.A., Cherkashina N.I., Kulenko E.A. Physical and chemical model of interaction of preparations of a lignine in processes of cleaning of ZRW. *Jekologija i razvitie obshhestva*, 2015, No. 2(13), – pp. 23-27.
2. Gruzdeva A.N., Hamizov R.H., Zolotarev P.P. About the theoretical description of processes of an intra diffusion sorption and desorption in ion-exchange sorbents. *Sorbcionnye i Hromatograficheskie processy*, 2008, T. 8, No. 1, p. 99.
3. Kokotov Yu.A., *Teoreticheskie osnovy ionnogo obmena: slozhnye ionoobmennye sistemy* [Theoretical bases of ion exchange: the composite ion-exchange systems]. Leningrad, Chemistry, 1986, 280 p.

References

1. Erofeyev V.A., Cherkashina N.I., Kulenko E.A. Physical and chemical model of interaction of preparations of a lignine in processes of cleaning of ZRW. *Jekologija i razvitie obshhestva*, 2015, No. 2(13), – pp. 23-27.
2. Gruzdeva A.N., Hamizov R.H., Zolotarev P.P. About the theoretical description of processes of an intra diffusion sorption and desorption in ion-exchange sorbents. *Sorbcionnye i Hromatograficheskie processy*, 2008, T. 8, No. 1, p. 99.
3. Kokotov Yu.A., *Teoreticheskie osnovy ionnogo obmena: slozhnye ionoobmennye sistemy* [Theoretical bases of ion exchange: the composite ion-exchange systems]. Leningrad, Chemistry, 1986, 280 p.

УДК 661.7.547

Химико-технологический процесс получения сорбента на основе природного материала

Н.И. Черкашина

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия. selyanskij-as@ya.ru

Статья поступила 20.06.2016 г.; после доработки 22.06.2016 г.

Аннотация

Предложен новый механохимический метод модификации лигнина, который привел к изменению функционального и структурного состава и образованию новых соединений, обладающих повышенной химической активностью. Составлен материальный баланс, технологическая и аппаратурная схема производства нового сорбента «Фолиоокс-КМП». Произведен гидродинамический расчет процесса фильтрации через слоя зернистого материала на основе лигнина, который учитывает основные независимые параметры процесса фильтрации. Рассчитан экономический эффект от применения сорбента «Фолиоокс-КМП» вместо традиционного КУ-2-8 при очистке жидких радиоактивных отходов (ЖРО).

Ключевые слова: сорбент, гидролизный лигнин, механохимическая обработка, Фолиоокс, лигниносодержащий материал.

Chemical-Technological Process of Obtaining a Sorbent Based on Natural Material

N.I. Cherkashina

Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
selyanskij-as@ya.ru

Received 20.06.2016 y.; received in final form 22.06.2016 y.

Abstract

The proposed new method of mechanochemical modification of lignin, which resulted in a change in the functional and structural composition and the formation of new compounds with enhanced chemical activity. Composed of material balance, technological and instrumental scheme of production of a new sorbent "Folioks-KMP". Produced hydrodynamic calculation process is filtration through a layer of granular material on the basis of lignin, which takes into account the main independent parameters of the filtration process. Calculated the economic effect of the sorbent "Folioks-KMP" instead of traditional KU-2-8 in the purification of liquid radioactive waste (LRW).

Keywords: sorbent, lignin, mechanochemical processing, Folioks, lignin-degrading material.

Введение

Известно, что обработка лигнина в дезинтеграторе и других измельчителях без использования неорганических ингредиентов сопровождается его модификацией, при этом увеличивается содержание до 12 % гидроксильных (кислых) групп, наблюдаются разнообразные структурные

изменения, свидетельствующие о разрушении его сетчатой структуры, в результате чего содержание свободных радикалов возрастает на 50 %. Интенсификация размола приводит к более глубоким структурным изменениям лигнина [1].

Механохимическая обработка гидролизного лигнина вызывает разрушение его химических связей, интенсификация процесса в присутствии

модификаторов приводит к более глубоким структурным изменениям [2]. Теоретической предпосылкой возможности механохимической модификации явилось структурное строение макромолекулы лигнина. Модификация протекает в условиях термодинамического процесса с разрывом связей углерода с другими атомами в макромолекуле лигнина с последующим взаимодействием диссоциированных неорганических ингредиентов.

Известная технология процесса производства сорбента на основе лигнина предполагает предварительный обжиг, с последующей отмывкой материала, что влечет к образованию газообразных выбросов и жидких отходов.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – разработать новый механохимический метод модификации лигнина, который привел к изменению функционального и структурного состава и образованию новых соединений, обладающих повышенной химической активностью.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- составить материальный баланс, предложить технологическую [3] и аппаратную схему производства нового сорбента «Фолиоокс-КМП» с использованием сравнительно недорогого оборудования отечественного производства;
- произвести гидродинамический расчет процесса фильтрации через слоя зернистого материала «Фолиоокс-КМП» учитывает основные независимые параметры процесса фильтрации;
- исследовать физико-химические и сорбционные свойства исследуемого материала [4-8];
- рассчитать экономический эффект от применения «Фолиоокс-КМП» вместо традиционного КУ-2-8 при очистке жидких радиоактивных отходов.

Процесс производства сорбента «Фолиоокс-КМП» состоит из следующих стадий [3]: предварительное измельчение лигниносодержащего материала; обезжиривание органического лигниносодержащего материала; совместное измельчение в шаровой мельнице материала с модифицирующими добавками в течении фиксированного времени; промывка сорбционного материала с последующей сушкой.

Материальный баланс технологического процесса

Рассматривая схему получения модифицированного сорбционного материала безводным методом можно отметить, что данный способ является безотходным. Следовательно, уравнение материального баланса будет состоять из 2-х частей: исходные продукты, готовый материал и побочные продукты.

К исходным продуктам, участвующим в процессе модификации, относятся: исходное сырье (скорлупа ореха, косточек персика, абрикоса и т.д.); реагенты, пошедшие на модификацию; промывная смесь, воздух, пошедший на сушку сорбента. К побочным продуктам: промывная вода, влажный воздух после сушки. К исходным продуктам, участвующим в процессе модификации, относятся: исходное сырье (скорлупа ореха, косточек персика, абрикоса и т.д.); реагенты, пошедшие на модификацию; промывная смесь, воздух, пошедший на сушку сорбента, к побочным продуктам - промывная вода, влажный воздух после сушки.

Технология производства сорбента на основе лигнина «Фолиоокс-КМП», которая заключается в том, что повторное измельчение лигниносодержащего материала проходит вместе с модифицирующими добавками безводным способом, который отличается тем, что не предполагает предварительный обжиг, с последующей отмывкой материала, чем сокращает затраты на производство и объемы дополнительных отходов.

1. Предварительное измельчение.

При измельчении лигниносодержащего материала крупностью 35...50 мм выход фракции 1...5 мм.

Масса предварительно измельченного материала, кг:

$$m_2 = m_1 \cdot k,$$

где k – к.п.д. грохота g .

2. Классификация.

Масса частиц в предварительно измельченном лигниносодержащем материале > 2 мм m_3 , кг; к.п.д. грохота. К.п.д. = $m_4/m_3 \cdot 100\%$, где m_3 – масса частиц в предварительно измельченном лигниносодержащем материале, кг, m_4 – масса частиц, прошедших через отверстия (просев).

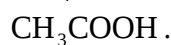
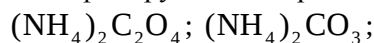
$$m_2 = m_4 + m_5,$$

где m_5 – масса частиц размером более 2 мм (отсев).

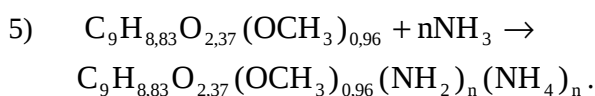
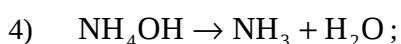
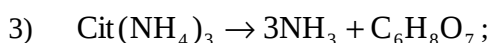
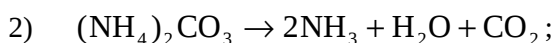
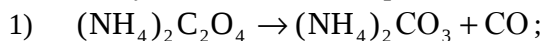
3. Механохимическая модификация.

Объем воды, пошедший на промывку, объем промывочного раствора, л плотность, г/л, набухаемость материала, %.

Модифицирующие ингредиенты:



При нагревании в шаровой мельнице протекают следующие химические реакции:



4. Сушка.

Количество сухого воздуха, проходящего через сушилку – L , кг, влажность материала до сушки – W_1 , %, влажность материала после сушки – W_2 , %, влагосодержание воздуха при входе в калорифер – x_0 , влагосодержание воздуха при выходе из сушилки – x_2 .

Количество влаги, удаляемой из материала в сушилке:

$$W = L \cdot (x_2 - x_0).$$

Количество высушенного материала:

$$m_{\text{сух.сorb.}} = \frac{W \cdot (100 - W_1)}{W_1 - W_2}.$$

5. Классификация.

Таким образом, произведен расчет в результате которого из 100 кг исходного лигниносодержащего сырья образуется 32,7 кг необходимого сорбента, а так же, предложена технологическая схема производства нового сорбента для которого можно использовать сравнительно недорогое оборудование отечественного производства.

Выбор технологического оборудования

При решении в конкретной производственной ситуации, т.е. вопроса о включении в комплекс того или иного технологического оборудования следует использовать критерии (показатели) производительности оборудования, надежности, экономической эффективности, эргономики, экологии и охраны труда, технико-эксплуатационные показатели технологического оборудования. На первом этапе подбор оборудования в комплексы следует осуществлять по показателям назначения и по производительности на основании материального баланса.

Так как основным процессом в производстве сорбента является измельчение, выбор способа и технологической схемы измельчения, типоразмеров, материалов рабочих органов и режима работы измельчителей зависит от свойств сырья (прочности, гранулометрического состава, термо- и химической стойкости и т.д.).

Для автоматической подачи перерабатываемого сырья массой 100 кг необходимо отечественное сравнительно недорогое оборудование с минимальными параметрами: ширина – 950 мм, длина – 8 м, ленточный питатель ЛП-АПМ-5/1.

На стадии предварительного измельчения максимальный размер сырья 3-5 мм (ореховая скорлупа) и необходимый объем переработки составляет 100 кг с максимальной производительностью 86 кг до размера частиц <2 мм. Наиболее подходящим по цене и технологическим параметрам является роторный измельчитель ИРВ-02.

Для классификации измельченного сырья на фракции частицами > 2 мм и < 2 мм требуются грохоты инерционные ГИС производительностью 43300 кг/ч. Сырье размером менее 2 мм должно быть взвешено на ленточном весовом дозаторе непрерывного действия 4488ДН-У для определения точного количества модифицирующих ингредиентов.

Для подачи химических реагентов массой не более 2 кг требуется емкость 5-10 л. Далее смесь подается вместе с предварительно измельченным сырьем для дальнейшей модификации в ленточный смеситель СЛ-0,15 минимальной емкостью 150 л.

Для измельчения сырья массой 52 кг вместе с химическими реагентами требуется оборудование с оптимальными технологическими параметрами - шаровая мельница МШФ 900х1800.

Для отмывки сорбента требуется 512 л дистиллированной воды находящейся в баке емкостью 600 л. Промывные воды, содержащие соли, накапливаются в специальном баке 600 л. Полученный сорбент весом 60 кг необходимо высушить - сушильный барабан Т 136.

Сухой сорбент классифицируется на фракции 1 мм и 0,5 мм, < 0,3 мм. Для этого требуются грохоты инерционные ГИС 33 с производительностью 300-700 кг/ч. Далее продукт по ленточному конвейеру КЛ-40-12-18 поступает на дальнейшую классификацию на фракции размером < 0,3 мм, $0,08 \pm 0,015$ мм, > 0,3 мм на сито вибрационное СВ/ВРК-900 с производительностью 5 м³/ч.

Аппаратурная схема производства сорбента приведена на рисунке.

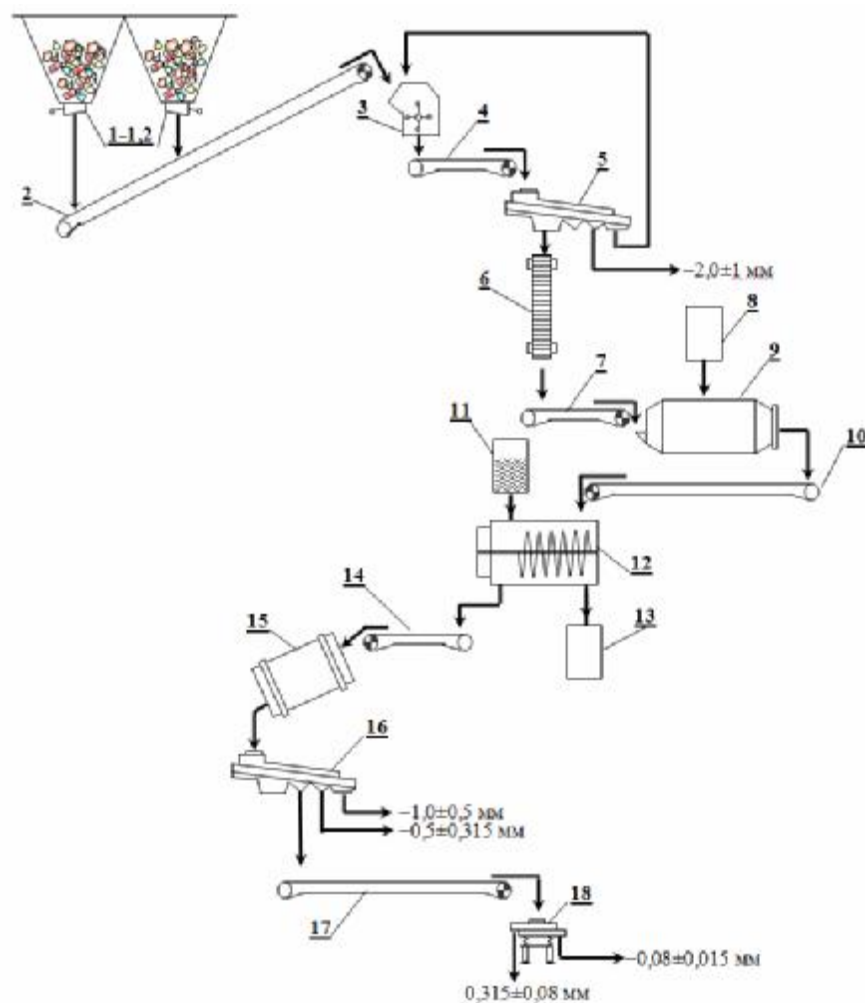


Рис. Аппаратурная схема процесса производства модифицированного лигниносодержащего сырья:

- 1 – питатель ленточный; 2, 4, 7, 10, 14, 17 – конвейер ленточный; 3 – роторный измельчитель;
5, 16 – грохоты инерционные; 8, 11, 13 – емкость; 9 – смеситель ленточный; 6 – ленточный весовой дозатор;
12 – шаровая мельница МШФ 900х1800; 15 – барабан сушильный Т 136; 18 – сито вибрационное

Таким образом, произведен расчет материального баланса в результате которого из 100 кг исходного лигниносодержащего сырья образуется 32,7 кг необходимого сорбента, а так же, предложена технологическая и аппаратурная схема производства нового сорбента «Фолиокс-КМП» с использованием сравнительно недорогого оборудования отечественного производства.

Гидродинамические и эксплуатационные характеристики полученного материала

Гидродинамическое сопротивление слоя зернистого материала [9] рассчитывается с помощью уравнения движения жидкости через неподвижный зернистый слой:

$$\Delta p = l \frac{H}{d_s} \frac{r(w_0/e)^2}{2}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент сопротивления определяется для всех режимов движения обобщенной зависимостью: $\lambda = 133/Re + 2,34$.

При движении жидкости через слой зернистого материала турбулентность развивается при значительно меньших значениях Re , чем при движении жидкости по трубам, поэтому для ламинарного течения $Re < 50$.

При расчете переменной лимитирующей величиной для $Re < 50$ является высота слоя сорбента. При проведении эксперимента величина рассчитанного Δp при $H = 30$ см составила $0,1 \text{ Н/с}^2$.

Процесс работы намывного фильтра подчиняется зависимости, экспериментально установленной Дарси [9-10]:

$$W = \frac{\Delta p}{h \cdot (R_1 + R_2)}, \quad (2)$$

где W – скорость фильтрации, м/ч; Δp – перепад давления, Па; η – динамическая вязкость, Н·с/м²; R_1 – сопротивление фильтрующего слоя; R_2 – сопротивление фильтрующей перегородки.

Скорость фильтрации можно выразить и через производительность намывного фильтра:

$$W = \frac{dV}{F \cdot dt}, \quad (3)$$

где V – скорость фильтрации, м/ч; F – площадь фильтровальной поверхности, м²; t – время фильтроцикла, ч. Гидравлическое сопротивление слоя сорбента

$$\Delta p = z \cdot \frac{L}{\partial} \cdot \frac{w^2}{2g} \cdot g_p, \quad (4)$$

где g_p – плотность раствора; ∂ – размер гранул сорбента; g – ускорение свободного падения; z – коэффициент гидравлического сопротивления.

Коэффициент гидравлического сопротивления:

$$Re = \frac{w \cdot d}{n}, \quad (5)$$

Пользуясь уравнением (4) и (5) получаем зависимость, характерную для постоянной фильтрации:

$$\Delta p = h \cdot W \cdot r_1 \cdot x + h \cdot R^2 \cdot W, \quad (6)$$

где r_1 – удельное сопротивление первичного слоя; X – отношение веса или объема намывного слоя фильтроматериала и фильтрата.

В этом случае, общее уравнение фильтрации будет иметь вид, характеризующий изменение давления при фильтрации:

$$\Delta p = h \cdot r_2 \cdot W \frac{C_m \cdot W_t}{d \cdot K_d}, \quad (7)$$

где r_2 – удельное сопротивление слоя сорбента, формирующегося из подпитываемого фильтропорошка и захватываемой им взвеси; C_m – масса фильтропорошка при подпитке; d – плотность слоя порошка; K_d – коэффициент, характеризующий изменение плотности фильтроматериала при включении в него взвеси.

Тогда производительность намывного фильтра описывается уравнением:

$$V = P \cdot \frac{\Delta p}{W}, \quad (8)$$

где P – коэффициент проницаемости (м³/м²·Па), зависит от скорости фильтрации, размера под-

питки, вязкости фильтрующей жидкости, характеристики намывного слоя и др.

$$P = P_0 \cdot W;$$

Общее выражение, учитывающее основные независимые параметры процесса фильтрации, можно представить уравнением:

$$V = \frac{P_0 \cdot \Delta p \cdot d K_d \cdot K_n}{h \cdot C_m \cdot W^m}, \quad (9)$$

где P_0 – определяется экспериментально и характеризует объем воды, который можно пропустить через фильтр со скоростью 1 м/ч при перепаде давления 0,1 МПа и минимальной подпитке, обеспечивающей линейную зависимость роста перепада давления; K_n – коэффициент, характеризующий соотношения массы фильтропорошка и взвеси в фильтруемой воде; m – показатель степени, определяет характер влияния скорости фильтрации на изменение объема пропущенной воды.

Уравнение (9) показывает, что возрастание продолжительности фильтрационной способности сорбента можно достигнуть увеличением конечного перепада давления, кратности подпитки или уменьшением скорости фильтрации.

Таким образом, гидродинамический расчет процесса фильтрации через слой зернистого материала «Фолиоокс-КМП» учитывает основные независимые параметры процесса фильтрации (удельное сопротивление слоя сорбента, скорость фильтрации, изменение давления при фильтрации и т.д.).

Рассчитанный экономический эффект от применения «Фолиоокс-КМП» для процесса очистки от радионуклидов цезия 137 и стронция 90 вместо традиционного КУ-2-8 при очистке 12,5 тыс.л ЖРО составил около 126 тысяч рублей в ценах 2015 г.

Выводы

1. Произведен расчет материального баланса в результате которого из 100 кг исходного лигниносодержащего сырья образуется 32,7 кг необходимого сорбента, а так же, предложена технологическая и аппаратная схема производства нового сорбента «Фолиоокс-КМП» с использованием сравнительно недорогого оборудования отечественного производства.
2. Гидродинамический расчет процесса фильтрации через слой зернистого материала «Фолиоокс-КМП» учитывает основные независимые параметры процесса фильтрации (удельное сопротивление слоя сорбента,

скорость фильтрации, изменение давления при фильтрации и т.д.).

3. Экономический эффект от применения «Фолиокс-КМП» вместо традиционного КУ-2-8 при очистке 12,5 тыс.л ЖРО составил около 126 тысяч рублей в ценах 2015 г.

Список литературы

1. Ерофеев В.А. К вопросу о взаимодействии лигнинов с неорганическими модификаторами при механохимической обработке / В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина // Сб. науч. тр. СТУЯЭиП. – Севастополь: СТУЯЭиП, 2011. – № 2 (38). – С. 184 - 189.
2. Пат. 78908 Украины, МПК51 В 01 J 20/22 (2006.01). Технология производства сорбента на основе лигнина (патент на изобретение) / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев.; заявитель и патентообладатель СТУЯЭиП. – № u 2012 09109; заявл. 10.04.2013; опубл. 12.07.13, Бюл. № 7. – 5 с.
3. Пат. 93824 Украины. Технология производства сорбента на основе лигнина / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев.; заявитель и патентообладатель СТУЯЭиП. – № а 2013 93824; заявл. 10.04.2013; опубл. 12.07.13, Бюл. № 23 (I ч.). – 6 с.
4. Ерофеев В.А. Очистка трапных вод и технологических сред первого контура от радионуклидов и нефтепродуктов сорбентами на основе лигнина / В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина // Водоочистка, 2011. – № 10. – С. 40 - 44.
5. Черкашина Н.И. Технология получения сорбционных материалов на основе лигнина для утилизации жидких радиоактивных отходов / Н.И. Черкашина // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Севастополь: изд-во СТУЯЭиП, 2011. – 22 с.
6. Ерофеев В.А. Использование сорбентов на основе отходов переработки растительного сырья при очистке сточных вод и технологических сред / В.А. Ерофеев, Е.А. Кульченко, Н.И. Черкашина // Экологическая безопасность, 2013. – № 2 (16). – С. 89 - 92.
7. Черкашина Н.И. Очистка сточных вод от ионов металлов сорбентами из природных материалов на основе лигнина / Н.И. Черкашина, А.С. Черкашин, И.И. Марончук // Новый университет. Серия: Технические науки, 2015. – № 11-12 (45-46). – С. 51 - 57.
8. Черкашина Н.И. Исследование эффективных сорбционных материалов для извлечения радионуклидов из технологических сред / Н.И. Черкашина, О.В. Ведищева // Материалам научно-практической конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности», 15-18 июня 2016 г., г. Севастополь. – Севастополь: СевГУ, 2016. – 356 с.
9. Басниев К.С. Нефтегазовая гидромеханика; уч. пособ. для ВУЗов / К.С. Басниев., Н.М. Дмитриев, Г.Д. Розенберг // Институт компьютерных исследований. – М. –Ижевск, 2005. – 544 с.
10. Биркгоф Г. Гидродинамика. Методы. Факты. Подobie / Г. Биркгоф; пер. со второго переработанного английского издания И.Б. Погребысского. – М.: Изд-во Иностранной литературы, 1963. – 246 с.

References

1. Erofeev V.A. Cherkashina N.I. To the question about the interaction of lignin with inorganic modifiers to the mechanochemical treatment. *Sbornik nauchnyh trudov SNUNE&I*. Sevastopol, SNUNE&I, 2011. No. 2 (38). pp. 184-189.
2. Erofeev V.A., Cherkashina N.I. *Tekhnologiy proizvodstva sorbenta na osnove lignina* [A method of producing stone of the modified powder of organic sorbent]. Patent 93824 Ukraine, МПК51 В 01 J 20/22, В 01 J 20/30, С 02 F 1/28..no. а 2010 04280, 2010
3. Cherkashina N.I., Erofeev V.A., *Tekhnologiya proizvodstva sorbrnta na osnove lignina*. [The production technology of the sorbent on the basis of lignin]. Patent 93824 Ukraine, no А 2013 93824, 2013/
4. Erofeev V.A., Cherkashina N.I. Cleaning floor drain waters and fluids of the primary circuit from radionuclides and petroleum sorbents based on lignin Water purification. *Vodoochistka*, 2011, Vol. 10, pp. 40-44.
5. Cherkashina N.I. *Tekhnologiya polychenijsorbcionnix materialov na osnove lignina dlja ytilizacii jidkih radioaktivnix otkodov*. [The technology of obtaining sorption materials based on lignin for utilization of LRW] / the dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences – Sevastopol: publishing house SUNE and industry 2011. – 22 p.
6. Erofeev V.A, Kulenko E.A., Cherkashina N.I. The use of sorbents based on waste processing of vegetable raw materials in the purification of wastewater and technological environments. *Ekologicheskaya bezopasnost*, 2013, No. 2(16), pp. 89-92.
7. Cherkashina N.I., Cherkashin A.S., Maronchuk I.I. Wastewater treatment from metal ions by sorbents from natural materials based on lignin New University. *Novyy universitet, Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2015, No. 11-12 (45-46), pp. 51-57.
8. Cherkashina N.I., Vedisheva O.V. The study of effective sorption materials for extraction of radionuclides of technological environments. *Materialnyachno-prakticheskoy konferentsii "Aktualnye bo-prosy yaderno-khimicheskikh tekhnologii i ekologicheskoy bezopasnosti"*. ["Topical issues of nuclear-chemical technologies and ecological safety"]. Sevastopol: SevGU Publ., 2016. 356 p.
9. Basniev K.S., Dmitriev N.M., Rosenberg. G.D *Neftgazovaya mexanika* [Oil and gas hydromechanics]. Moscow –Izhevsk: Institute of computer science, 2005. – 544 p.
10. Lloyd G. *Hydrodynamica. Metody. Fauty. Podobie*. [Hydrodynamics, Methods. Facts. Similarity] translated from the second revised English edition by I. B. Pogrebysskii. Moscow, GOS. publishing house of foreign literature, 1963. – 246 p.

ISSN 2413-5526

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 2 № 2**

**SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 2 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 sevsu.ru/l.v.litvinova@sevsu.ru
тел. +7(8692) 71-30-44, факс +7(8692) 71-01-38

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 *Л.В. Литвинова*

Подписано к печати 29.06.2016. Изд. № 248/16. Зак. 100/2016. Тираж 65 экз.
Объем 11,5 п.л. Усл. 10,629 п.л. Уч.-изд. л. 11,28. Формат бумаги 60 x 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»