

ISSN 2413-5526

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 5 № 3

**Севастополь
2019**

Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2019. – Т. 5. - № 3. – 100 с.: ил.

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

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

Редакционная коллегия:

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

Учредитель и издатель:

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

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

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

Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки	5
<i>Качур С.А., Скидан А.А., Бутович Э.В.</i> Прогнозирование эффективности стержней регулирования в процессе эксплуатации ЯЭУ на основе дискриминантного анализа	5
<i>Качур С.А., Скидан А.А., Зозулин А.А.</i> Прогнозирование изменения энергораспределением активной зоны реактора при перемещении стержней регулирования на основе регрессионного анализа	10
<i>Пухлий В.А., Пухлий К.В.</i> Гидродинамическая акустика. Сообщение 3. Акустический анализ явления обтекания тел турбулентным потоком жидкости	15
<i>Пухлий В.А., Коган Е.А., Мирошниченко А.С., Пухлий П.В.</i> Краевая задача Кармана для упругогогиба биметаллических трубопроводов атомной энергетики)	25
Автоматизация процессов контроля и управления	36
<i>Канов Л.Н., Лукашов В.Г.</i> Автоматическое управление беспилотным летательным аппаратом	36
Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии	43
<i>Зайченко В.М., Кувишинов В.В., Какушина Е.Г.</i> Использование биомассы для получения синтез-газа	43
<i>Зайченко В.М., Ларина О.М., Кувишинов В.В., Какушина Е.Г.</i> Исследование процесса низкотемпературного пиролиза	48
<i>Зайченко В.М., Чернявский А.А., Кувишинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А.</i> Направления развития энергетики	53
Электротехнические комплексы и системы	62
<i>Смирнов В.В., Старченко Т.С., Старченко М.А.</i> Особенности применения объединенного регулятора потоков мощности	62
Химические технологии	66
<i>Акимов А.М., Ковалев Н.И., Котельникова С.А.</i> Механизм образования подземных пресных вод в районе Крымского полуострова	66
<i>Акимов А.М., Котельникова С.А.</i> Современные взгляды на механизм переноса вещества через пористые мембраны	71
<i>Черкашина Н.И.</i> Анализ оптимальных концентраций радиационно-защитных материалов	74
<i>Черкашина Н.И.</i> Исследование адсорбционных характеристик сорбентов на основе рисовой шелухи при извлечении свинца в одиночных и двойных системах	81
Экологическая безопасность	87
<i>Лямина Н.В., Косовская М.А.</i> Современные способы оперативной оценки экологического состояния прибрежных акваторий <i>in situ</i> : опыт применения.	87
Для авторов	98

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant	5
<i>Kachur S.A., Skidan A.A., Butovich E.V.</i> Prediction of the effectiveness of control rods in the process of operation of nuclear power units based on discriminant analysis	5
<i>Kachur S.A., Skidan A.A., Zozulin A.A.</i> Prediction of changes in power distribution of the reactor core during the movement of control rods based on regression analysis	10
<i>Pukhliy V.A., Pukhliy K.V.</i> Hydrodynamic acoustics. The message 3. The acoustic analysis of the phenomenon flow of bodies turbulent stream of liquid	15
<i>Pukhliy V.A., Kogan E.A., Miroshnichenko S.V., Pukhliy K.V.</i> Karman's boundary value problem for elastic bending of bimetallic pipelines of nuclear energy)	25
Process automation and control	36
<i>Kanov L.N., Lukashov V.G.</i> Automatic control of unmanned aerial vehicle	36
Alternative and renewable energy sources	43
<i>Zaichenko V.M., Kuvshinov V.V., Kakyshina E.G.</i> Synthesis gas production from various types of biomass	43
<i>Zaichenko V.M., Kuvshinov V.V., Kakyshina E.G.</i> Effect of low-temperature pyrolysis on properties of sewage sludge after anaerobic digestion	48
<i>Zaichenko V.M., Kuvshinov V.V., Kakyshina E.G.</i> Energy development directions	53
Electrotechnical complexes and systems	62
<i>Smirnov V.V., Starchenko T.S., Starchenko M.A.</i> Features of application of the unified power flow controller	62
Chemical technology of nuclear power plants	66
<i>Akimov A.M., Kovalev N.I., Kotelnikova S.A.</i> The mechanism of education of underground fresh water in the area of the Crimean peninsula	66
<i>Akimov A.M., Kotelnikova S.A.</i> Modern views on the mechanism of substance transfer through porous membranes	71
<i>Cherkashina N.I.</i> Analysis of optimal concentrations of radiation protective materials	74
<i>Cherkashina N.I.</i> Research of adsorptive characteristics of sorbents on the basis the rice peel at extraction of lead in single and binary systems	81
Environmental Safety	87
<i>Lyamina N.V., Kosovskaya M.A.</i> Modern methods of rapid assessment of the ecological status of coastal waters <i>in situ</i> : application experience	87
For cars	98

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.039.56

Прогнозирование эффективности стержней регулирования в процессе эксплуатации ЯЭУ на основе дискриминантного анализа

С.А. Качур, А.А.Скидан, Э.В. Бутович

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

Статья поступила 28.08.2019 г.; после доработки 30.08.2019 г.

Аннотация

Предложен метод прогнозирования эффективности стержней регулирования на основе статистической информации о функционировании реактора за последнее время с использованием алгоритмов классификации с обучением.

Ключевые слова: реактор, управление цепной реакцией, эффективность стержней регулирования, статистические методы, дискриминантный анализ.

Prediction of the effectiveness of control rods in the process of operation of nuclear power units based on discriminant analysis

S.A. Kachur, A.A. Skidan, E.V. Butovich

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

Received 28.08.2019 y.; received in final form 30.08.2019 y.

Abstract

A method for prediction the efficiency of control rods based on statistical information on the operation of the reactor in recent years using classification algorithms with training is proposed.

Keywords: chain reaction control, efficiency of control rods, statistical methods, discriminant analysis.

Введение

Среди функций автоматизированной системы контроля и управления (АСКУ) ядерными реакторами наиболее сложной является оптимизация энергораспределения по объему активной зоны [1-8]. Выравнивание энергораспределения в больших энергетических реакторах является необходимым условием эксплуатации, а оптимизация положения стержней регулирования – трудоемкий процесс, который сводится к необходимости перебора большого числа вариантов.

Качество и скорость решения задачи управления энергораспределением в большой мере зависят от опыта оператора.

Применение ЭВМ разгружает оператора, позволяет получить более выровненное энергораспределение. ЭВМ может применяться в режиме советчика оператора или в режиме замкнутого контура регулирования.

В настоящее время в замкнутом контуре регулирования применяются системы логико-программного управления или адаптивные системы регулирования.

Проблема снижения трудоемкости алгоритмов оптимизации управления энергораспределением актуальна в настоящее время. До сих пор не разработаны оптимальные алгоритмы, выполняемые в замкнутом контуре регулирования.

Одной из задач решаемой при управлении энергораспределением реактора является определение эффективности стержня регулирования. Обычно распределение потоков нейтронов по высоте реактора описывают синусоидальной функцией.

В действительности эта функция может иметь иной вид.

Применение сложных математических расчетов в процессе функционирования реактора не всегда возможно из-за временных ограничений.

Поэтому предлагается определять зависимость эффективности стержня от его положения в активной зоне по имеющимся статистическим данным о текущем процессе и его предыстории. В статье рассматривается возможность применения дискриминантного анализа для решения данной задачи.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является выявление зависимости эффективности стержня регулирования по высоте активной зоны на основе статистических данных о работе реактора с использованием дискриминантного анализа для прогнозирования перемещения стержней.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) анализ существующих подходов для определения эффективности стержней регулирования;
- 2) рассмотрение возможности использования дискриминантного анализа для определения изменения эффективности стержня по высоте;
- 3) создание алгоритма определения эффективности стержней регулирования.

Способы определения эффективности стержней регулирования

Регулирование реактора осуществляется изменением коэффициента размножения за счет изменения скорости производства нейтронов, поглощения их или утечки. Скорость производства нейтронов можно регулировать, изменяя количество ядер горючего в активной зоне; скорость утечки регулируется в основном эффективностью отражателя; скорость поглощения может регулироваться изменением количества находящихся в активной зоне ядер элементов с большим сечением поглощения нейтронов (без образования вторичных нейтронов).

Вне зависимости от материала-поглотителя

можно различать следующие основные методы реализации управления цепной реакцией посредством изменения количества поглотителя в активной зоне:

- a) управление, основанное на введении в активную зону стержней-поглотителей;
- b) управление, осуществляемое изменением уровня жидкого поглотителя в активной зоне, концентрации поглощающих ядер в растворе или какого-либо другого параметра, приводящего к изменению количества ядер-поглотителей в активной зоне. В частности, поглотитель может вводиться в жидкий замедлитель или теплоноситель;
- c) управление, основанное на изменении в активной зоне давления газообразного поглотителя;
- d) введение в активную зону поглотителя, «выгорающего» за счет захвата нейтронов.

Выгорание поглотителя должно быть согласовано с выгоранием ядерного топлива.

Выгорающий поглотитель может быть использован как некоторая составляющая композиции ТВЭЛ или в виде самостоятельного элемента.

При использовании выгорающих поглотителей значительно уменьшается диапазон изменения реактивности за счет выгорания ядер делящегося вещества.

Применение выгорающего поглотителя дает следующие преимущества:

- при одном и том же объеме активной зоны может быть увеличена загрузка топлива, что позволяет увеличить продолжительность работы данной активной зоны без перегрузки;
- количество стержней компенсации начальной избыточной реактивности сокращается;
- выгорающие поглотители можно использовать для выравнивания энергораспределения. Примерное изменение реактивности в высокотемпературном графитовом реакторе с газовым охлаждением в течение кампании его эксплуатации с использованием выгорающих поглотителей изображено на рис. 1.

При размещении в активной зоне реактора не одного, а нескольких поглощающих стержней суммарная эффективность их может быть не равна сумме эффективности каждого.

Это неравенство возникает вследствие искажения поля нейтронов, характер которого может быть иллюстрирован рис. 2, на котором видно, что при близком расположении стержней (стержни 2 и 3) их суммарная эффективность будет уменьшаться, а при достаточно удаленном

расположении (стержни 3 и 4) – увеличиваться.

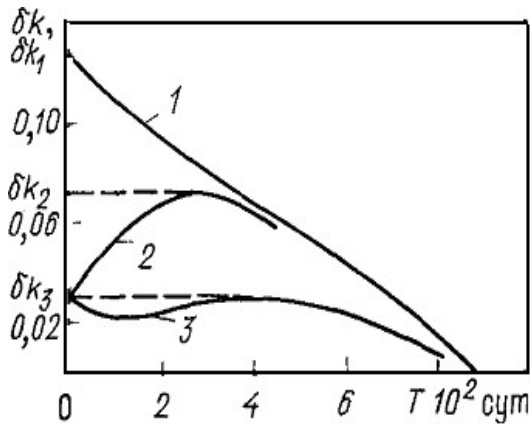


Рис. 1. Влияние выгорающих поглотителей на зависимость избытка эффективного коэффициента размножения нейтронов (δk) от времени работы (T) реактора на номинальной мощности: 1 — без выгорающих поглотителей; 2 — равномерно распределенный борный поглотитель; 3 — блокированный борный поглотитель

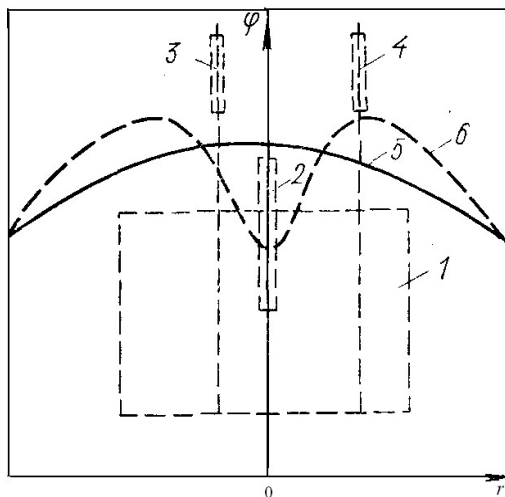


Рис. 2. Иллюстрация интерференции стержней: 1 – активная зона; 2 – центральный стержень; 3 – близко расположенный стержень; 4 – удаленный стержень; 5 – невозмущенная плотность потока; ϕ – плотность потока нейтронов, возмущенного введением центрального стержня

Если принять плотность потока нейтронов $\phi(z) = \phi_0 \sin(\pi z / H)$, то можно получить

$$\delta k(z) = \delta k(H) \frac{z}{H} \left[1 - \frac{\sin(2\pi z / H)}{2\pi z / H} \right] \quad (7)$$

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

Изменение реактивности при выведении

стержня из реактора приведено на рис. 3.

В реальных условиях распределение потока нейтронов по высоте реактора может отличаться от синусоидального, поэтому кривые веса (эффективности) стержней регулирования будут иметь другой вид.

Приведенные формулы расчета эффективности стержней могут служить для оценки размеров стержней, их размещения и числа.

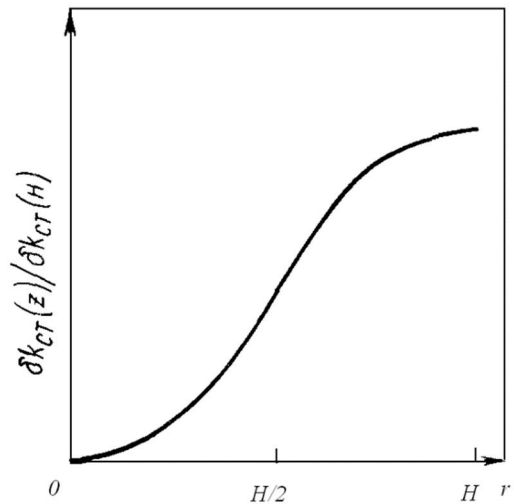


Рис. 3. Зависимость эффективности стержня регулирования от его положения по высоте активной зоны

Изложенное выше свидетельствует о сложности определения эффективности стержня при эксплуатации реактора.

Идентификация параметров стержня на основе статистического метода классификации

Предварительный анализ и математический расчет должен определить классы функций, описывающие распределение нейтронного потока по имеющимся данным.

Функции могут быть заданы таблично. Количество точек табличной формы соответствует числу ДПЗ в измерительном канале.

Исходные данные для дискриминантного анализа в рассматриваемой задаче представляет множество описаний энергораспределения по высоте активной зоны, например, в виде, приведенном на рис. 4.

Исследовать непосредственно по величине мощности не целесообразно. Необходимо рассматривать приведенные значения мощности, т.е. делить показания ДПЗ на текущее значение мощности на выходе канала.

Предположим, что количество функций распределения мощности по высоте равно K .

Используя алгоритм оптимального управления, можно найти мощности Q_i на выходе каждого канала и величину $\delta\rho_j$ вносимой стержнями реактивности.

Задача дискриминантного анализа может быть сформулирована следующим образом.

Предположим, рассматривается K классов функций аксиального распределения мощности.

Класс описывается двумерным вектором параметров $(Q_i, \delta\rho_j)$.

Необходимо знать, к какому классу будет относиться описание функции энергораспределения по высоте, если известны прогнозируемые значения $(Q_{0i}, \delta\rho_{0j})$ хотя бы для одного канала активной зоны. Обучающие выборки строятся не только на базе информации вида рис.4, но и рис. 5. По формуле (7) в соответствии с выбранной функцией определяем эффективность стержня.

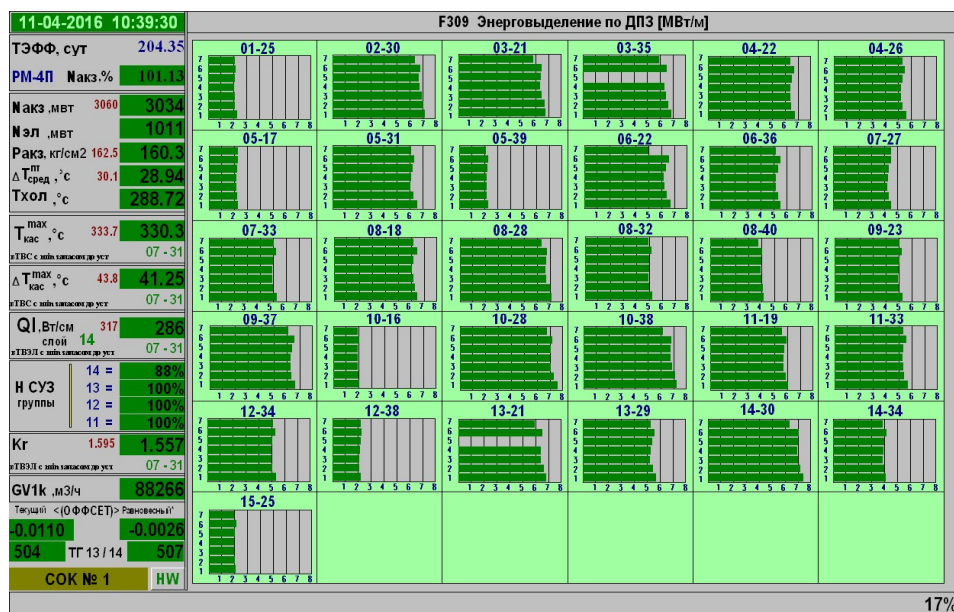


Рис. 4. Пример описания линейного энергораспределения в активной зоне по ДПЗ

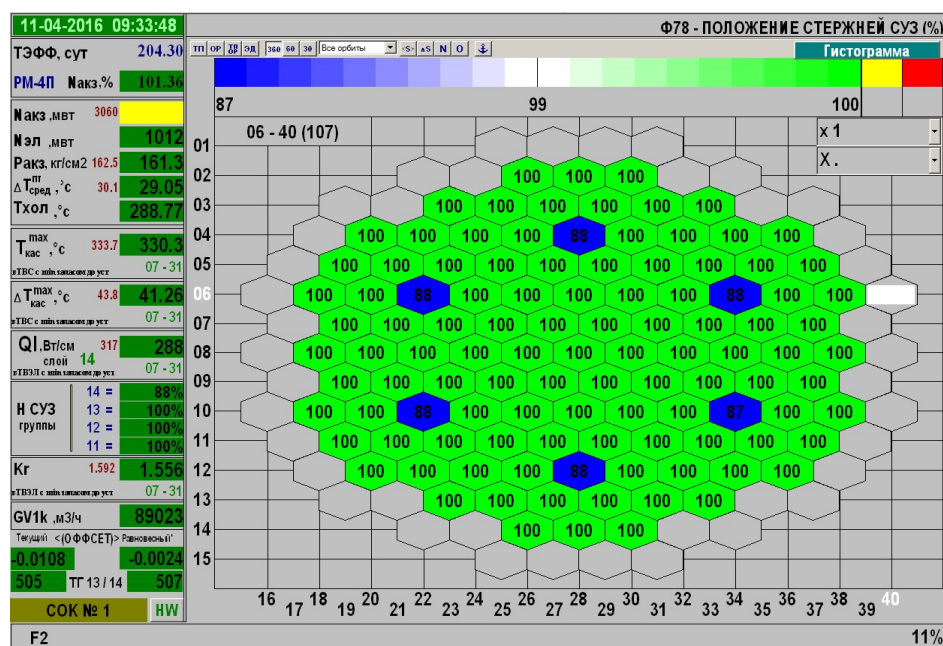


Рис. 5. Картограмма, показывающая высоту стержней управления и защиты.

В работе [9] предлагается решить задачу управления мощностью посредством методов линейного программирования. Это дает возможность снизить трудоемкость решения. Результатом будут вектора значений Q_i и δr_j .

Для исследования возможностей предлагаемого подхода на базе дискриминантного анализа целесообразно использовать статистический прикладной пакет MINITAB.

Заключение

Предложен метод определения эффективности стержней регулирования на основе статистической информации о функционировании реактора за последнее время. Обработка данных основывается на алгоритме классификации с обучающей выборкой, а именно, дискриминантном анализе.

Разработанный метод позволит снизить временные затраты на определение эффективности стержня за счет выполнения трудоемких расчетов, связанных с построением корреляционных матриц обучающей выборки, предварительно, до прогнозирования состояния активной зоны.

Исследование направлено на повышение эффективности систем контроля и управления ЯЭУ.

Список литературы

1. Емельянов И.Я., Ефанов А.И., Константинов Л.В. Научно-технические основы управления ядерными реакторами. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360с.
2. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынов А.М. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоиздат, 1988. – 136с.
3. Крамер Э.У. Ядерные реакторы с кипящей водой. – М.: Из-во иностр. лит-ры, 1960. – 509с.
4. Качур С.А. Идентификация формы поля тепловыделения в камере смешения ядерного реактора/ С.А. Качур // Пром. теплотехника. – Т.33, №4, 2011. – С.70-76.
5. Качур С.А. Исследование управляемости ядерного реактора на основе анализа функции Бесселя/ С.А. Качур // Сб.науч.тр.СНУЯЭтаП – Вып.2(46). – Севастополь: СТУЯЭиП, 2013. – с.36-45.
6. Бахмач Е.С. Программно-технические комплексы автоматического регулирования, разгрузки и ограничения мощности реактора и ускоренной предупредительной защиты: обеспечение и оценка безопасности / Е.С. Бахмач, С.В. Виноградская, К.В. Розен и др. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2005. – №1. – С. 67-90.

7. Еременко В.А. Пути обеспечения безопасного управления атомными энергетическими установками – К.: Техника, 1988. –256с.
8. Мирошник И.В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, А.Л. Фрадков – СПб.: Наука, 2000. –382 с.
9. Качур С.А. Оптимальное управление энергораспределением ядерного реактора на основе методов линейного программирования/ С.А. Качур // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2018. – Т.4. – №1. – С. 18-23.

References

1. Emelyanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantsnov L.V. *Nauchno-tehnicheskie osnovi 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 bezopasnosti YaEU* [Methods of estimation and providing of the NPE safety]. Moscow, Energoizdat, 1988, 136 p.
3. Kramer E. Y. *Yadernie reaktori s kipyashey vodoy* [Nuclear reactors with boiling water]. Moscow, Izvo inostr. lit-ri, 1960, 509 p.
4. Kachur S.A. Control by nuclear reactor by means of external electromagnetic radiation. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2011, Vol. 33, No. 4, pp. 70-76.
5. Kachur S.A. *Research of dirigibility of nuclear reactor on the basis of analysis of the Bessel function*. *Sb. nauch. tr. SNUYaE ta P*, Sevastopol, SNUYaE ta P, 2013, No. 2(46), pp. 36-45.
6. Bahmach E.S., Vinogradskaya S.V., Rozen K.V. Programmatic-technical complexes of automatic control, unloading and limitations of power of reactor and speed-up preventive sewn up: providing and estimation of safety. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost'*.2005, No1, pp.67-90.
7. Eremenko V.A. *Puti obespecheniya bezopasnogo upravleniya atomnymi energeticheskimi ustanovkami* [Ways of providing of safe management by the atomic power plants]. Kiev, Techika, 1988. 256p.
8. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* [Adaptive control by the difficult dynamic systems]. SPb, Nauka, 2000. 382 p.
9. Kachur S.A. Optimum Control by Power Distribution of Nuclear Reactor on the Basis of Methods of the Linear Programming. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2016, Vol. 4, No 1, pp. 18-23.

УДК 621.039.56

Прогнозирование изменения энергораспределением активной зоны реактора при перемещении стержней регулирования на основе регрессионного анализа

С.А. Качур, А.А. Скидан, А.А. Зозулин

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

Статья поступила 02.09.2019 г.; после доработки 04.09.2019 г.

Аннотация

Предложен метод прогнозирования изменения энергораспределения активной зоны на основе статистической информации о функционировании реактора за последнее время с использованием регрессионного анализа и линейного программирования.

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

Prediction of changes in power distribution of the reactor core during the movement of control rods based on regression analysis

S.A. Kachur, A.A. Skidan, A.A. Zozulin

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

Received 02.09.2019 y.; received in final form 04.09.2019 y.

Abstract

A method for predicting changes in the energy distribution of the core on the basis of statistical information on the operation of the reactor in recent years using regression analysis and linear programming is proposed.

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

Введение

Обоснованию и обеспечению безопасной эксплуатации атомных станций и атомных энергетических установок уделяется чрезвычайно большое внимание.

При обосновании безопасности выполняются объемные и глубокие исследования и анализ статистических данных.

С каждым годом возрастает стоимость и сложность информационных систем.

Среди функций автоматизированной системы контроля и управления (АСКУ) ядерными реакторами наиболее сложной является оптимизация энергораспределения по объему активной зоны [1-8]. Выравнивание энергораспределения

в больших энергетических реакторах является необходимым условием эксплуатации, а оптимизация положения стержней регулирования – трудоемкий процесс, который сводится к необходимости перебора большого числа вариантов. Качество и скорость решения задачи управления энергораспределением в большой мере зависят от опыта оператора.

Применение ЭВМ разгружает оператора, позволяет получить более выровненное энергораспределение. ЭВМ может применяться в режиме советчика оператора или в режиме замкнутого контура регулирования. В настоящее время в замкнутом контуре регулирования применяются системы логико-программного управления или адаптивные системы регулирования.

Проблема снижения трудоемкости алгоритмов оптимизации управления энергораспределением актуальна в настоящее время.

В статье предлагается метод снижения размерности поставленной задачи.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является прогнозирование изменения энергоснабжения активной зоны в радиальном направлении за счет перемещения стержней регулирования, основываясь на регрессионном анализе статистических данных, для повышения быстродействия СКУ АЭС.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) рассмотрение возможной математической постановки задачи оптимального управления энергораспределением в канальном реакторе;
- 2) определение коэффициентов в модели изменения мощности реактора на основе регрессионного анализа;
- 3) создание метода, позволяющего сократить размерность задачи прогнозирования положения стержней.

Постановка задачи оптимального управления энергораспределением в канальном реакторе

Рассмотрим одну из возможных математических постановок задачи оптимального управления энергораспределением в канальном реакторе с учетом реальных ограничений, накладываемых на основные управляемые параметры.

Изменение мощности в i -м канале в линейном приближении можно записать в виде

$$\delta_i Q = \sum_{j=1}^n a_{ij} \delta r_j, \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

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

Изменение реактивности за счет обратных связей имеет вид

$$\delta r = \sum_{j=1}^n c_j \delta r_j, \quad (2)$$

где c_j – коэффициенты, учитывающие влияние обратных связей.

Если влиянием обратных связей пренебречь, то $c_j = 1$. Так как предполагается, что стержень АР компенсирует все возмущения реактивности, то

$$\sum_{j=1}^n c_j \delta r_j + \delta r_{AP} = 0, \quad (3)$$

δr_{AP} – реактивность, создаваемая перемещением стержня АР.

При регулировании энергораспределения необходимо постоянство полной мощности реактора, поэтому

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n a_{ij} \delta r_j = 0. \quad (4)$$

Ограничение на перемещение стержней регулирования, учитывая условие ядерной безопасности и механические характеристики исполнительных механизмов, записывают в виде

$$\delta r_{j \min} \leq \delta r_j \leq \delta r_{j \max}. \quad (5)$$

Предположим, что цель управления заключается в том, чтобы удовлетворяя условиям (3–5), добиться максимума теплотехнической надежности реактора, т.е. сделать возможно большим минимальный коэффициент запаса k до предельно допустимой мощности канала

Если $Q_i^{\text{пред}}$ одинаково для всех каналов реактора, то задача управления сводится к минимизации коэффициента неравномерности

$$k_r = \max(Q_i / Q_{\text{ср}}),$$

$$k_{r_i} = Q_i / Q_{\text{ср}},$$

$$Q_{\text{ср}} = (1/N) \sum_{i=1}^N Q_i$$

или

$$-k_r + \frac{k_i}{Q_i} \sum_{j=1}^n a_{ij} \delta r_j \leq -k_{r_i} \quad (6)$$

при выполнении условий (3–5).

Выбор вычислительных методов решения этой задачи определяется требуемой точностью оптимального управления при разумных затратах вычислительного времени и объемах запоминающих устройств.

Одной из проблем приведенной формулировки задачи является определения коэффициентов a_{ij} в (1).

Определение коэффициентов связи мощности в канале с реактивностью, вносимой стержнем, на основе регрессионного анализа

Регрессионный анализ – это восстановление по имеющимся наблюдениям предикатной переменной ξ и результирующего показателя η

$$\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$$

неизвестной функции регрессии $M[\eta/\xi=X]=f(X)$.

Регрессионный анализ включает следующие этапы.

1. Выбор класса допустимых решений F – класса функций, в рамках которого предполагается вести поиск наиболее подходящей аппроксимирующей функции $\hat{f}_a(x)$ для $f(X)$.

Предварительное определение аппроксимирующей функции $\hat{f}_a$ связано в основном с изучением «геометрии» парных корреляционных полей. Под корреляционным полем переменных (x, y) понимают графическое представление имеющихся измерений $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ этих переменных в плоскости (x, y) .

2. Статистическое оценивание параметров. Определение оценок $\hat{\theta} = (\hat{\theta}^{(1)}, \hat{\theta}^{(2)}, \dots, \hat{\theta}^{(s)})$ для неизвестных параметров $\theta = (\theta^{(1)}, \theta^{(2)}, \dots, \theta^{(s)})$ функции $f_a(X, \theta)$. Наиболее часто для получения оценок параметров используют метод наименьших квадратов (МНК).

3. Проверка гипотезы об общем виде функции регрессии с использованием статистических критериев. Пусть высказана гипотеза H_0 : $M[\eta/\xi=X]=f_a(X, \theta^{(1)}, \theta^{(2)}, \dots, \theta^{(s)})$ и определены оценки $\hat{\theta}^{(1)}, \hat{\theta}^{(2)}, \dots, \hat{\theta}^{(s)}$. Тогда с помощью статистических критериев можно подтвердить или отвергнуть данную гипотезу.

Поскольку требования к быстродействию системы управления высоки, изменение состояния происходит стремительно, нет необходимости в большой точности регрессионных моделей, которые используются в первую очередь для прогнозирования. Проверка адекватности модели существенной роли не играет.

Для описания зависимости энерговыделения конкретного канала в активной зоне от изменения положения стержней выберем многофакторную линейную функцию. В качестве факторов будут выступать реактивность, вносимая стержнями, соответствующая, например, 10, 20, ..., 100 процентному извлечению стержней. Для простоты будем рассматривать изменение положения стержней в относительных единицах с заданным шагом (0,1, ..., 1). Результирующий показатель также является относительной величиной, показывающей, во сколько раз изменилась мощность Q_i на выходе i -го канала при погружении стержней на W_j процентов (в долях w_j) относительно мощности Q_0 полного извлечения стержней из активной зоны. При наличии k каналов и m градаций w_j регрессионная модель примет вид.

$$\delta Q'_i = \frac{Q_i}{Q_0} = \sum_{j=1}^m a_{ij} w_j, \quad i = \overline{1, k}. \quad (7)$$

Исходная информация может быть представлена в виде картограмм (рис.1, рис. 2).

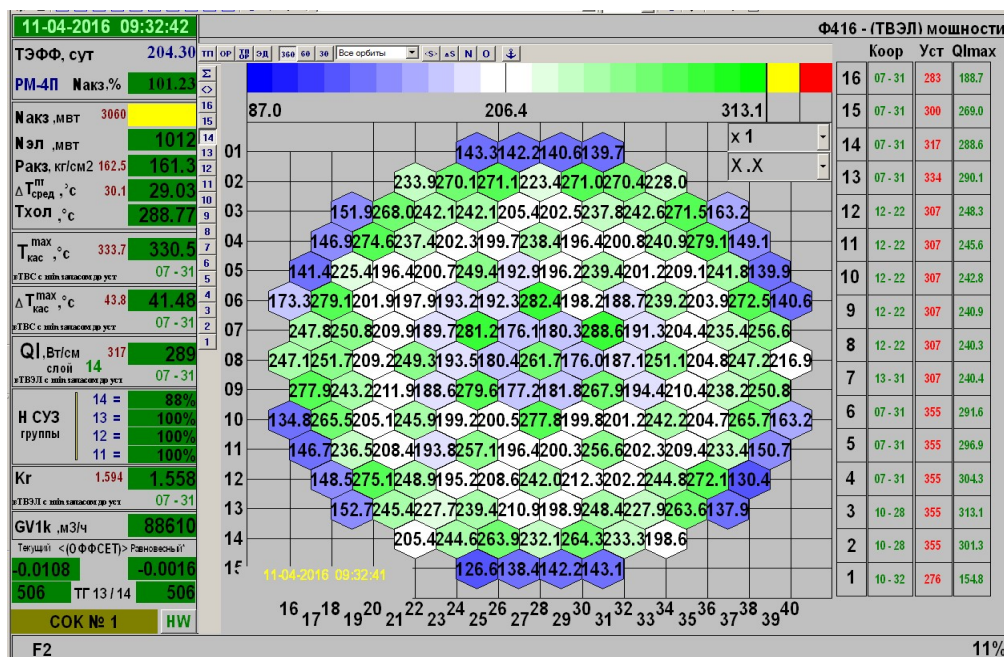


Рис. 1. Картограмма энерговыделения по объему активной зоны

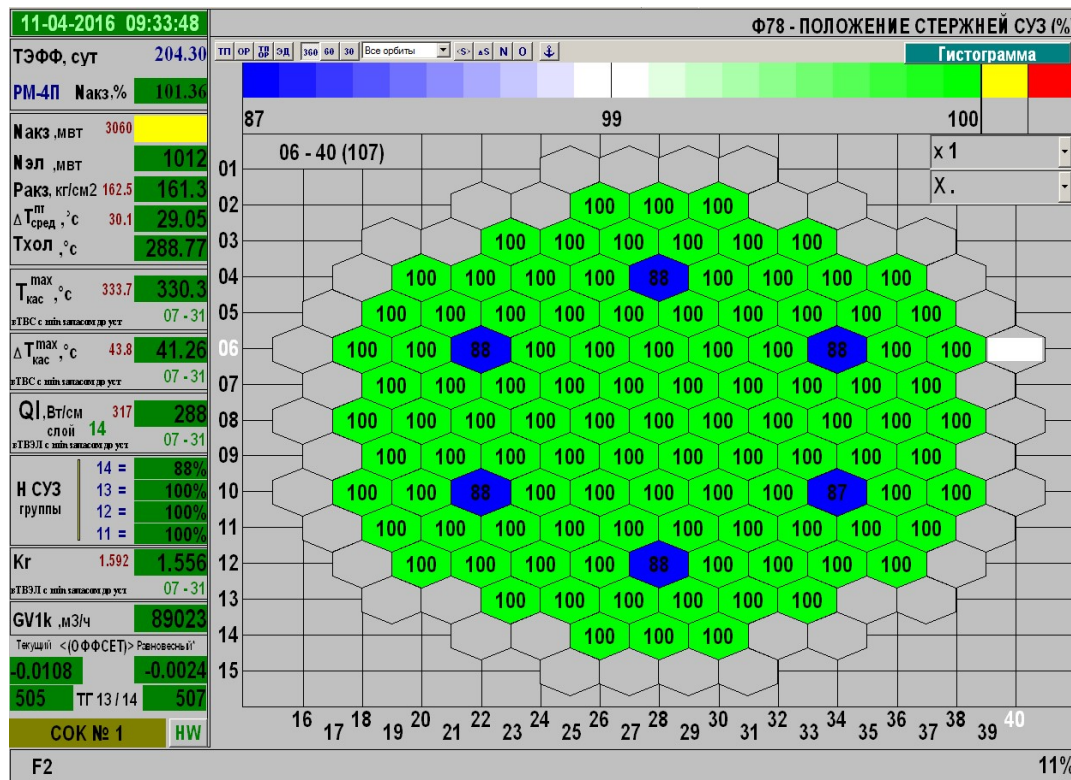


Рис. 2. Картограмма, показывающая высоты стержней управления и защиты.

Заключение

Предложен метод определения коэффициентов в модели управления мощностью реактора, а именно, коэффициентов связи мощности в канале с реактивностью, вносимой стержнем, на основе статистической информации о функционировании реактора за последнее время. Обработка данных основывается на основе регрессионного анализа

Разработанный метод позволит снизить временные затраты на определение коэффициентов связи мощности в канале с реактивностью, вносимой стержнем, за счет выполнения трудоемких расчетов, связанных с построением корреляционных матриц.

Исследование направлено на повышение эффективности систем контроля и управления ЯЭУ.

Список литературы

1. Емельянов И.Я., Ефанов А.И., Константинов Л.В. Научно-технические основы управления ядерными реакторами. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360с.
2. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынов А.М. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоиздат, 1988. – 136с.

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

References

1. Emelyanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantsnov L.V. *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 bezopasnosti YaEU* [Methods of **estimation** and providing of the NPE safety]. Moscow, Energoizdat, 1988, 136 p.
 3. Kramer E. Y. *Yadernie reaktori s kipyashey vodoy* [Nuclear reactors with boiling water]. Moscow, Izvo inostr. lit-ri, 1960, 509 p.
 4. Kachur S.A. Control by nuclear reactor by means of external electromagnetic radiation. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2011, Vol. 33, No. 4, pp. 70-76.
 5. Kachur S.A. *Research of dirigibility of nuclear reactor on the basis of analysis of the **Bessel** function*. *Sb. nauch. tr. SNUYaE ta P*, Sevastopol, SNUYaE ta P, 2013, No. 2(46), pp. 36-45.
 6. Bahmach E.S., Vinogradskaya S.V., Rozen K.V. Programmatic-technical complexes of automatic control, unloading and limitations of power of reactor and speed-up preventive sewn up: providing and estimation of safety. *Yadernya i radiacionnaya bezopasnost'*.2005, No1, pp.67-90.
 7. Eremenko V.A. *Puti obespecheniya bezopasnogo upravleniya atomnymi energeticheskimi ustanovkami* [Ways of providing of safe management by the atomic power plants]. Kiev, Tekhika, 1988. 256p.
 8. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* [Adaptive control by the difficult dynamic systems]. SPb, Nauka, 2000. 382 p.
- Kachur S.A. Optimum Control by Power Distribution of Nuclear Reactor on the Basis of Methods of the Linear Programming. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2016, Vol. 4, No 1, pp. 18-23

УДК 534.2:532.5

Гидродинамическая акустика. Сообщение 3. Акустический анализ явления обтекания тел турбулентным потоком жидкости

В.А.Пухлий¹, К.В.Пухлий²

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Курчатова, 7, г.Севастополь, 299015, Россия, e-mail: pu1611@rambler.ru

²Предприятие «Аэротекс», 127349, Москва, ул.Мурановская, 17-147

Статья поступила 06.09.2019 г.; после доработки 11.09.2019 г.

Аннотация

Структурные образования типа вихря-решетки и активной вихревой дорожки в различных сочетаниях позволяют строить расчетные схемы отрывных обтеканий различных тел с вычислением аэродинамической силы сопротивления и кинетики ближнего следа. Данный структурный анализ распространяется также и на турбулентное движение.

Ключевые слова: структурные модели, вихревые образования вихрь-решетки, отрывные течения, турбулентное течение, кинетика ближнего следа

Hydrodynamic acoustics. The message 3. The acoustic analysis of the phenomenon flow of bodies turbulent stream of liquid

V.A.Pukhliy¹, K.V.Pukhliy²

¹Sevastopol state university, Kurchatova, 7, Sevastopol, 299015, Russia, e-mail: pu1611@rambler.ru

²Enterprase «Aerotex», 127349, Moscow, Muranovsky street, 17-147

Received 06.09.2019 y.; received in final form 11.09.2019 y.

Abstract

Structural educations of type of whirlwind-lattice and active vortical path in various combinations allows to build settlement schemes spasmodic currents of various bodies with calculation of aerodynamic force of resistance and kinetica near trace. The given structural analysis extends as well on turbulent movement.

Keywords: structural models, vortical educations of a whirlwind-lattice, spasmodic currents, a turbulent current, kinetica a near trace

Введение

В предыдущих работах [1, 2] были рассмотрены структурные модели обтекания тел, а также модель струйного истечения, составляющими элементами которой являются вихревые образования. Структурные образования типа вихря-решетки и активной вихревой дорожки в различных сочетаниях позволяют строить расчетные схемы отрывных обтеканий различных тел с вычислением аэродинамической силы со-

противления и кинетики ближнего следа. Вышеприведенный структурный анализ был распространен также и на турбулентное движение [2].

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является изучение проблемы современного состояния аэрогидродинамической акустики и распространения структурного подхода к уравнениям движения в

аэрогидродинамике и аэрогидродинамической акустике на турбулентное движение жидкости.

Аналитический анализ явления обтекания тела турбулентным потоком жидкости

В работе [2] автором представлена структурная картина турбулентного следа за плохо обтекаемым телом.

Такая структурная картина полагается исходной при акустическом анализе явления обтекания тела жидкостью. В самом деле, в дополнение к вышеизложенному, гидродинамическое взаимодействие вихря и связанное с ним излучение звука можно представить следующим образом.

Примем, как и ранее, за исходную структуру вихрь-решетку. Она, в частности, может быть одним из образований в структуре вихревого следа сзади тела, в струе, и т.д. Пространство, отделяющее ее от других вихрей-решеток, можно рассматривать как часть внешнего потока. Поэтому изменение во внешнем пространстве течения можно рассматривать как воздействие этой части на индивидуальный вихрь-решетку.

В свою очередь, реакция ее на внешнее воздействие, в случае маловязкой жидкости, вызывается порождением касательных напряжений и связанных с ними пульсаций скоростей. Все это, в конечном счете, связано с изменением поля давления как во внешней части потока, так и внутри вихря.

Происходит это следующим образом. Пусть в результате какого-то внешнего воздействия изменяется поле скоростей и давлений в системе $\Omega + \Sigma$ (Ω – пространство, занятое вихревой структурой, в частности вихрем-решеткой, а Σ – окружающая ее область).

Это изменение может быть двоякого рода. Первый случай характеризуется тем, что изменение этих полей в слабо сжимаемой жидкости аналогично изменению в несжимаемой жидкости, т.е. во всем рассматриваемом пространстве $\Omega + \Sigma$ движение происходит без учета фактора запаздывания.

Для такого случая всегда найдется система координат, в которой поток будет стационарным. Как показал Д.Н.Блохинцев [3], в таких системах излучение звука отсутствует.

В качестве примера таких систем можно указать на вихревое кольцо, движущееся в достаточно большом жидком объеме со стационарными условиями на границах, дорожку Кар-

мана, пограничный слой на передней стороне обтекаемого гладкого тела, свободные стационарные вихревые поверхности Гельмгольца, образующие границы струи и следов за телами и т.д.

В частности, на внешней и внутренней стороне таких поверхностей по всей их длине (двумерный случай) условие стационарности, вытекающее из уравнения неразрывности, будет:

$$v_{\tau_1} = \text{const}_1; \quad v_{\tau_2} = \text{const}_2. \quad (27)$$

где v_{τ_1}, v_{τ_2} – касательные составляющие скорости с внешней и внутренней сторон поверхности соответственно.

Рассматривая движение жидкого вихревого элемента в свободном потоке в системе координат, жестко связанных с движением его «центра тяжести», мы будем наблюдать продольные и сдвиговые деформации его при условии выполнения следующих соотношений:

– в случае непрерывно распределенной завихренности

$$\Gamma = \int_{\Delta S} \gamma ds = \text{const}; \quad (28)$$

– в случае представления вихревого элемента как вихря-решетки

$$\Gamma = \sum_{i=1}^N \chi_i = \text{const}, \quad (29)$$

$$\text{rot rot } \vec{v} = 0, \quad (30)$$

где ΔS – площадь жидкого элемента; γ – вихревая плотность; χ_i – циркуляция элементарного вихорька в вихре-решетке; Γ – циркуляция жидкого элемента; $\vec{v}$ – скорость в пределах этого элемента.

При замене достаточно тонкого вихревого слоя, состоящего из вихревых элементов, поверхностью разрыва, характерной для идеальной жидкости, условия на границах остаются в обоих случаях одинаковыми, так как движение жидкости как сплошной среды определяется уравнениями неразрывности, из которых эти условия непосредственно и вытекают.

Итак, для первого случая характерен «бездействующий», пассивный вихревой элемент, свободно деформирующийся в несущем его внешнем свободном потоке.

Перейдем к рассмотрению второго случая, для которого не существует стационарности в пределах $\Omega + \Sigma$, причем границы областей $\Omega + \Sigma$ и Σ могут быть как угодно близки друг другу.

Так как размеры вихревого элемента Ω значительно меньше длины волны вихревого звука, то гидродинамическое поле слабо сжимаемой

жидкости в окрестности этого элемента идентично полю в несжимаемой жидкости [4].

Поэтому применение уравнения движения несжимаемой жидкости при анализе взаимодействия вихревого элемента с изменяющимся в пространстве и времени внешним полем давления и связанного с этим взаимодействием вихревого звука, вполне оправдано.

Запишем это уравнение в следующем виде:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \nabla) \vec{v} = \frac{\nabla p(r)}{\rho} - \frac{\nabla p(r, t)}{\rho} + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{v}, \quad (31)$$

где $|\mu \Delta \vec{v}| \ll \nabla p(r), \Delta p(r, t)$ – жидкость маловязкая; $p(r), p(r, t)$ – стационарная и нестационарная части давления в точке $r + dr$ пространства в момент времени $t + dt$, r, t – текущие величины в пространстве-времени; dr, dt – бесконечно малые их приращения.

Предположим, что в начальный момент наша система в области $\Omega + \Sigma$ стационарна, т.е. отсутствует локальный член в уравнении (31), а градиентное поле представлено только стационарной частью.

Тем самым реализуется первый случай. Пусть далее с момента времени t_0 возникает изменяющееся во времени поле давлений.

Это изменение, как показывают уравнения Лайтхилла (2) и Пауэлла [5], распространяется со скоростью звука (левые части уравнений представлены волновым оператором). Достигая в момент времени t_1 границ вихря-решетки, оно порождает на его границах новое поле градиентов давлений.

В момент времени $t_1 + \Delta t$ ($\Delta t \ll 1$) это поле будет состоять из стационарной части $\nabla p(r)$, вызывающей изменение конвективного члена, и нестационарной $\nabla P(r, t_1 + \Delta t)$, действие которого вследствие распространения нестационарной части давления со скоростью звука и принятом нами условии $M \ll 1$ подобно ударному, т.е. при достаточно малых скоростях в направлении суммарного ударного импульса можно записать:

$$\vec{F} = |F| \vec{\tau} = \int \int_{\Delta t G} p \cdot \vec{n} ds dt.$$

Уравнение (31) примет следующий вид:

$$\frac{\partial \vec{v}_\tau}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \nabla p(r, t) + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{v}_\tau + \beta_\tau, \quad (32)$$

где $\vec{n}$ – единичный вектор-нормаль к граничной поверхности σ вихря-решетки; $\vec{\tau}$ – единичный вектор в направлении суммарного импульса,

$$|\beta_\tau| \ll \left| \frac{1}{\rho} \nabla p(r, t) \right|.$$

В результате ударного воздействия градиентов давления, начинающегося с границ вихря-решетки и проникающего далее на всю его область, происходит смещение элементарных вихревых трубок составляющих вихрь-решетку в направлении местных импульсов давления. Нарушается равновесное состояние качения этих трубок друг по другу без относительного сдвига.

Это приводит к возникновению касательных усилий по поверхности этих вихорьков, значения которых связаны с градиентом давлений соотношением:

$$\vec{\tau} = K \int_{\Delta S} \nabla p ds, \quad (33)$$

где $K = K(t) < 1$; ΔS – поверхность элементарного вихорька.

Таким образом, вихрь-решетку можно рассматривать как систему, подчиненную ряду условий, из которых существенны следующие:

- Система вначале подчинена некоторым связям без трения, не зависящим от времени.
- Система подвержена действию внутренних сил – давлений, обеспечивающих устойчивое равновесие вихря-решетки (градиент давления направлен внутрь вихря).
- Она содержит «тела» (вихревые трубки), скользящие с трением друг по другу.
- Она находится под действием внешних массовых сил, имеющих ограниченную силовую функцию.
- Давление в каждой точке системы имеет конечную величину.

Такая система, как показал П.Аппель [6], стремится избежать трения, и соответствующие скольжения (сдвиги) пытаются исчезнуть.

Система стремится освободиться также и от нормальных реакций, вызывающих эти связи с трением, т.е. от нестационарных градиентов давлений.

Скольжение может исчезнуть в основном за счет увеличения или ослабления вращения элементарных вихревых трубок, происходящих в результате сближения или удаления их друг от друга.

Приведенное здесь рассуждение глубже раскрывает влияние вязкости, какой бы малой величины она не была, на процесс деформации вихря-решетки с образованием гильмгольцевых «скрытых» движений под влиянием изменяющихся градиентов давлений.

Переход к связям без трения, как показал Аппель, происходит за конечный промежуток

времени δt , который можно назвать временем запаздывания или перехода.

Отметим, что это относится как к сжимаемой, так и к несжимаемой жидкости.

Эта «инерция» вихревых трубок (и самого вихря-решетки) на внешнее возмущение и связанное с нею время запаздывания δt зависит от ряда причин: от величины начальной циркуляции вихревых трубок γ , расстояния между трубками δ , величин нестационарных градиентов внешнего поля давления в пределах вихря-решетки $\frac{\partial p}{\partial n}(x, t)$, распределения давления по его границам $p(x, t)$, размеров вихря-решетки D .

Таким образом, в уравнении (33) коэффициент $K = f\left(t, \gamma, \delta, p, \frac{\partial p}{\partial n}, D\right)$.

Например, если имеются два вихря одинаковой циркуляции $\Omega_1 = \Omega_2$, где

$$\Omega_1 = \sum_{i=1}^{N_1} \left[\int_{\omega} \text{rot } v \, d\omega \right]_j,$$

$$\Omega_2 = \sum_{j=1}^{N_2} \left[\int_{\omega} \text{rot } v \, d\omega \right]_i,$$

$\int_{\omega} \text{rot } v \, d\omega$ – циркуляция элементарной вихревой трубки, причем $N_1 < N_2$. Тогда на основании

закона Био-Савара $\delta_1 < \delta_2$; $D_1 < D_2$.

При условии равенства перепадов давлений на границах вихрей-решеток

$$\int_{\Delta S_1} p \vec{n} ds_1 = \int_{\Delta S_2} p \vec{n} ds_2$$

следует, что $\delta t_1 < \delta t_2$, где δt_1 и δt_2 – соответственно время запаздывания, идентичное времени реакции вихря на воздействие внешнего одиночного импульса давления $\int_{\Delta t} p dt (\Delta t \ll 1)$

для первого и второго вихрей.

Пусть вихрь-решетка находится в стационарном внешнем потоке. Предположим, что это прямолинейный плоский поток, равномерно движущийся в горизонтальном направлении.

Известно, что центр вихря движется совместно со всем потоком.

В системе координат, неподвижно связанной с этим центром, вся система вихрь-внешний поток стационарна.

Это уже рассмотренный выше первый случай движения, при котором система не порождает звук. Не ограничивая общности анализа, будем рассматривать такую стационарную систему.

Пусть в момент времени $t = t_0$ изменяющееся поле давления вне вихря находилось на минимальном расстоянии D от неподвижного вихря (D – его диаметр), причем фронт движения импульса достаточно широк, чтобы накрыть все «миделево» сечение вихря-решетки. В момент времени $t_1 = t_0 + \frac{D}{C}$, (C – скорость звука)

начнется воздействие нестационарного поля давления на границах вихря-решетки. Можно еще принять, что граница фронта импульса имеет достаточно «гладкую» форму, которую можно определить с помощью следующего неравенства: $K_1 > K_2$ (K_1 – кривизна линии, соприкасающейся с внешними точками вихря-решетки и являющаяся его границей, K_2 – кривизна фронта импульса). Появление изменяющегося внешнего поля давления на границе неподвижного вихря-решетки ведет к новому распределению давления по его границе σ , суммарное векторное значение которого в момент времени $t_0 + \frac{D}{C} + \Delta St \left(\frac{d + \varepsilon}{C} \leq \Delta St \leq \frac{D}{C} \right)$ равно

$$|\vec{P}| = \int_{\sigma} p \cdot \vec{n} d\sigma, \text{ где } d - \text{максимальный диаметр}$$

вихрька во внешнем слое вихря-решетки, ε – максимальное расстояние между вихрьками в окрестности внешнего слоя, $\vec{l}$ – единичный вектор, фиксирующий направление суммарной силы давления $\vec{P}$ внешнего потока.

Необходимо подчеркнуть, что при $\Delta St < \frac{D}{C}$ только часть вихря, размеры которого

в глубину составляют $\Delta St \cdot C$, «чувствует» воздействие внешнего нестационарного поля давления, остальная часть, равная $D - \Delta St \cdot C$, еще находится в стационарном состоянии. Лишь

через время $\Delta St = \frac{D\eta}{C}$ (η – добавочный размер,

учитывающий кривизну фронта импульса) весь вихрь находится под действием этого поля.

Если рассматривать действие одиночного импульса давления, то необходимо задать его форму. Фронт импульса прямолинеен. Изменение поля давления в глубину от фронта по нормали $\vec{n}$: $\frac{\partial P}{\partial n}(n - Ct) = \text{const}$.

Давления в начале и конце импульса, соответственно равны $p_H = p_1$; $p_K = p_2$, т.е. импульс имеет сечение прямолинейного склона,

проникающего через вихрь-решетку со скоростью звука.

Графически это можно изобразить следующим образом:



Исходя из указанных соображений, докажем следующие леммы:

Лемма 1. Воздействие одиночного импульса давления со стороны внешнего поля на неподвижную вначале вихрь-решетку ведет к появлению нормальной к направлению импульса составляющей движения этого вихря.

Доказательство непосредственно вытекает из разобранного выше анализа движения вихря под действием разности давлений с двух его сторон.

Ударное воздействие меняющегося давления совместно с вязкостью, какой бы малой величины она не была, вызывает перемещение вихрь-решеток с образованием повышенного вращения (за время запаздывания) со стороны вихрь-решетки, вращающейся «к удару», и пониженного вращения с противоположной стороны.

Этому состоянию должно отвечать дополнительное градиентное поле давлений, смещающее вихрь-решетку в поперечном к направлению основного воздействия.

Однако всякое смещение вихря-решетки в силу только что высказанных причин, ведет к повороту образующегося неоднородного поля завихренности в сторону вращения вихря до тех пор, пока градиент поля давления, связанный с неоднородностью, не станет равным по величине и противоположным по направлению импульсу внешнего поля.

Если время действия импульса Δt превышает время запаздывания для вихря-решетки δt ($\Delta t > \delta t$), то в дальнейшем вихрь-решетка будет двигаться при отсутствии касательных напряжений (только качение и отвечающее ему распределение скоростей по закону Био-Савара) с равномерной скоростью перпендикулярно направлению воздействия импульса. Направление перемещения $\vec{v}^0 = -(\vec{l} \times \vec{\omega}^0)$ ($\vec{\omega}^0$ – единичный вектор завихренности, $\vec{l}^0$ – единичный вектор импульса, $\vec{v}^0$ – единичный вектор перемещения), если считать систему координат правой.

На рис.15 показана схема перемещения вихря под действием внешнего импульса давления $\vec{P}$, при этом $+\Delta\omega$, $-\Delta\omega$ – области увеличенной и уменьшенной завихренности.

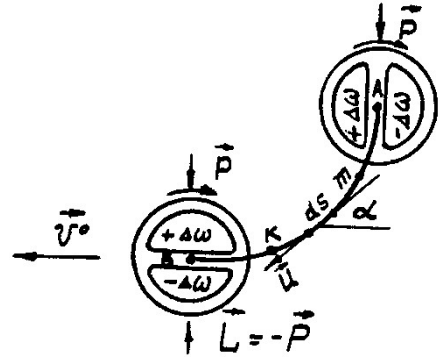


Рис.15. Схема перемещения вихря под действием внешнего импульса давления $\vec{P}$.

Для геодезической кривой, по которой происходит движение центра вихря, время запаздывания $\delta t = \frac{\pi}{2} \int \frac{r}{u} d\alpha$ (r – радиус кривизны элемента кривой; u – скорость движения центра вихря).

Если время действия внешнего импульса короче времени запаздывания, т.е. $\Delta t < \delta t$, то положение центра вихря может быть в любой промежуточной точке кривой, и значение градиента давления, определяемого смещением завихренности может быть различным.

Также различным будет и значение противодействующего импульса L , связанного с неоднородным распределением завихренности. Он может принимать значения $0 \leq |L| \leq |P|$.

Эта неоднозначность значения L связана не только со временем воздействия внешнего импульса, но и с его крутизной, т.е.

$$L = L\left(\Delta t, \frac{\partial P}{\partial n}[n - Ct]\right).$$

Изменение положения завихренности внутри вихря-решетки связано с увеличением его кинетической энергии, именно той ее части W , которая зависит от того, каким образом распределена эта завихренность [7]:

$$W = -\frac{\rho}{4\pi} \iint \omega(x, y) \omega(x', y') \ln \left\{ (x - x')^2 + (y - y')^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \times ds(x, y) ds(x', y'), \quad (34)$$

где $\omega(x, y), \omega(x', y')$ – величины завихренности, $r = \{(x - x')^2 + (y - y')^2\}^{\frac{1}{2}}$ – расстояние между двумя произвольными точками завихренности.

Для случая конечного числа вихорьков имеем:

$$W = -\frac{\rho}{4\pi} \sum_i \sum_j \gamma_i \gamma_j \ln r_{ij} + \alpha, \quad (i \neq j), \quad (35)$$

где γ_i, γ_j – интенсивности составляющих вихорьков в вихре-решетке; r_{ij} – расстояния между их центрами; $\alpha < W$.

Из формул (34) и (35) видно, что появление неоднородности завихренности внутри вихря-решетки (сближение вихорьков в одной ее части и расхождение в другой) ведет к увеличению энергии, что обеспечивается в целом логарифмическим множителем.

Следует указать также на неоднозначность значения энергии W в случае, если $\Delta t < \delta t$, т.е. как и с противодействующим импульсом,

$$W = W \left(\Delta t, \frac{\partial P}{\partial n} [n - Ct] \right).$$

При этом считаем, что в начальный момент Δt энергия может принимать значения: $0 \leq W \leq W_{\Delta t = \delta t}$.

Если рассматривать вихрь-решетку как комплексное образование, в свою очередь состоящее из более мелких вихрей-решеток (например, часть вихревого следа и т.д.), то для последних будет свое время запаздывания по величине существенно меньшее, чем для объединяющей их структуры. Это можно показать следующим образом.

Если отнести начальный вихрь-решетку к разряду «энергонесущих вихрей» [8], т.е. вихрей, время запаздывания для которых совпадает с временем колебания внешнего импульса, то более мелкие вихри, относящиеся к инерционной части области универсального равновесия, будут иметь большую завихренность, нежели более крупные.

Это прямо вытекает из соотношения [8]: $u'_K \approx l_K^{\frac{1}{3}}$ (u'_K – интенсивность турбулентности для волновых чисел, больших K , l – размер рассматриваемой области, размер вихря).

Это соотношение имеет силу вплоть до наиболее мелких вихрей, принадлежащих вязкой подобласти.

Увеличение завихренности при уменьшении размеров вихрей может происходить как за счет увеличения количества составляющих ви-

хорьков, так и за счет повышения их интенсивности.

Это приводит на основании закона Био-Савара и формулы (33) к уменьшению времени запаздывания δt . В связи с этим уменьшается величина «собственной» энергии (рис.9) [2]:

$$W(t) = \int_{K_1}^{K_2} E(K, t) dK.$$

Напрашивается вывод о том, что турбулентное движение «обнажает» структуры вихрей $(K \pm i)$ на различных уровнях вложения их друг в друга $(K - n) \subset \dots \subset (K - 1) \subset K \subset (K + 1) \subset \dots \subset (K + n)$.

Лемма 2. После прохождения однократного импульса остается неоднородное распределение завихренности внутри вихря-решетки и связанное с ним градиентное поле, действие которого приводит к вращению квазивихревой неоднородности в сторону вращения вихря-решетки.

Доказательство ее вытекает из условия сохранения интегральных инвариантов распределения завихренности [7] и из леммы 1.

Из последней следует, что градиент давления, остающийся после прохождения внешнего импульса, связанный с неравномерным распределением завихренности, будет стремиться сместить вихорьки в направлении его воздействия.

При этом, в силу ранее рассмотренных причин, возникает перпендикулярный к нему градиент давления, поворачивающий вихрь-решетку относительно его «центра завихренности». Угловая скорость вращения неоднородности этого вихря тем меньше, чем выше эта неоднородность (при условии одинаковой интенсивности составляющих вихорьков), чем больше величина:

$$R = \sum_i \sum_j \ln r_{ij} - \sum_i \sum_j \ln r_{ij}^0 \quad (i \neq j),$$

где $\ln r_{ij}^0$ – расстояние между центрами вихорьков при равномерном их распределении внутри вихря-решетки. Величина R неоднозначна и тем больше, чем больше значения $\Delta t (\Delta t \leq \delta t)$ и

$$\frac{\partial P}{\partial n} (n - Ct).$$

Последовательные во времени положения области концентрации завихренности в вихре-решетке приведены на рис.16:

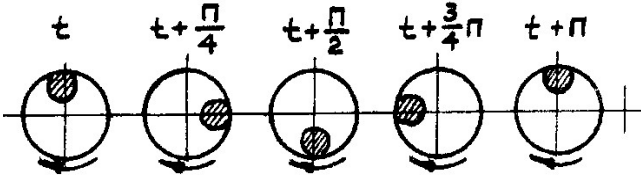


Рис.16. Схема положения области концентрации завихренности в вихре-решетке.

Лемма 2 показывает, что завихренность совершает собственные колебания в двух независимых направлениях (рассматривается двумерный случай). Периоды колебаний в каждом из направлений $T_1 = T_2 = 4\delta t$, (δt – время запаздывания).

Таким образом, вихрь-решетка ведет себя как упругая система, если рассматривать упругость на более тонком уровне, следуя В.Томсону, «как род внутреннего движения» [9]. Об этом уже упоминалось выше.

Как было показано, это относится к широкому классу вихрей-решеток независимо от того, являются ли они основными вихревыми структурами или входят в них как составляющие.

Все свойства упругих систем (жесткость, частота собственных колебаний и т.д.) относятся к вихрям-решеткам. Эти свойства, в общем случае, нелинейным образом зависят от времени воздействия внешнего импульса Δt , его крутизны $\frac{\partial P}{\partial n}(n - Ct)$, от диаметра вихря-решетки D , диаметра составляющих его вихрьков d_i , их интенсивности γ_i , числа N , расстояния между ними δ_i , (эти параметры упоминались выше применительно к времени запаздывания δt).

Если принять «жесткость» вихря-решетки, состоящего из одинаковых вихрьков, равной $K = \frac{A(\sum \gamma_i)^2}{\delta^2}$ (A – безразмерный коэффициент, $\pm \gamma_i$ – циркуляция составляющего вихрька, δ – площадь охвата вокруг вихрька, где появляются касательные силы взаимодействия), а второй параметр, учитывающий внутреннее движение в составляющих вихрьках, эквивалентным их количеству N , то время запаздывания δt и угловая частота собственных колебаний ω для различных вихрей-решеток с однородным распределением составляющих вихрьков при воздействии на них одного и того же импульса могут быть выражены следующим образом:

$$\Delta t = \frac{\pi}{2\omega} = \sqrt{\frac{N}{A} \cdot \frac{\delta^2}{\left(\sum_{i=1}^N \gamma_i\right)^2}}. \quad (36)$$

Например, увеличение завихренности и связанное с этим увеличение градиента скорости ведет к уменьшению времени запаздывания и к возрастанию собственной угловой частоты колебаний, т.е. к увеличению жесткости вихря. Увеличение расстояния между составляющими вихрьками увеличивает δt и уменьшает ω .

В качестве примеров, подтверждающих истинность леммы 1, укажем на следующее.

Если достаточно быстро сдвинуть пластинку в спокойной воде в направлении, перпендикулярном ее поверхности, и тут же вынуть, то образующиеся сзади пластинки вихревые шнуры будут вначале заметно притягиваться друг к другу, затем движение ускорится в направлении первоначального импульса, пока через время δt не установится равномерное движение центров завихренностей. В то же время можно наблюдать колебание завихренности в дальнейшем движении (о чем говорит лемма 2).

Ламб [10] указывает на притяжение вихревых шнуров друг к другу в начальный момент их образования. Объяснение естественным образом вытекает из леммы 1. Необходимо еще раз здесь подчеркнуть, что нестационарный импульс (в нашем случае разность давлений с двух сторон шнуров), если он имеет постоянное значение $\frac{\partial P}{\partial n}(n - ut)$, действует на вихревую систему только в течение времени запаздывания δt , после чего противодействующий импульс уравнивает его действие и движение в дальнейшем становится равномерным. Точнее говоря, через время δt можно найти систему координат, в которой локальный член в уравнениях движения пропадает. Пауэлл [5] отмечает, что при периодическом выбросе пара из локомотива, в тот момент, когда образуется большое кольцо в конце струи, слышится отчетливый импульсивный звуковой сигнал.

Образование большого вихревого кольца можно представить следующим образом. При периодическом истечении из отверстия вихревая система струи, в чем нетрудно убедиться, подвергается воздействию нестационарного градиента давления против ее движения.

Это приводит, согласно лемме 1, к возникновению поперечного смещения вихревой системы, интенсивность которого характеризуется

временем запаздывания δt . Воздействие двух причин (лемма 1) приводит к образованию вихревого кольца, которое может иметь еще дополнительное растяжение (до истечения δt), пока не начнет двигаться относительно равномерно вниз по струе.

Так как согласно Пауэллу образование звука связано с изменением площади кольца, то возникает акустическое дипольное поле с максимумом интенсивности нормальным к плоскости кольца.

Ниже мы дадим объяснение этого акустического эффекта на основании изменений, образующихся в каждом сечении самого вихревого кольца, а не в результате возникновения фиктивного дипольного поля в площади кольца согласно предположению Пауэлла.

Рассмотренная выше задача о воздействии внешнего нестационарного импульса давления определенной формы на одиночный вихрь-решетку легко может быть обобщена и на более сложные системы, в частности, на вихревые следы обтекаемого тела, струи и т.д.

В любом случае последовательно выбирая локальные области, содержащие вихрь-решетку и внешний поток, мы можем рассмотреть задачу в самом общем случае. При этом форма импульса, время его воздействия могут быть произвольными.

Принцип Аппеля позволил нам установить связь между касательными напряжениями, возникающими вследствие сдвига составляющих вихорьков друг относительно друга внутри вихря-решетки при воздействии на него внешнего импульса поля и давлениями внутри него.

При этом естественным образом полагается, что вне вихря-решетки касательные (сдвиговые) напряжения отсутствуют или пренебрежимо малы по сравнению с внутренними.

Это положение должно хорошо выполняться для всего энергетического спектра, образуемого флуктуирующими вихрями (рис.9) за исключением высоких волновых чисел K , где начинает сказываться влияние молекулярной вязкости [8].

В силу принципа Аппеля каждая система, представляющая из себя вихрь-решетку, стремится избавиться от касательных напряжений и от внешнего воздействия, вызывающего их появление. Эта реакция системы, происходящая за время запаздывания $\Delta t \leq \delta t$ (где δt – полное или собственное время запаздывания), приводит к изменению структуры завихренности внутри нее таким образом, чтобы движение вихря-решетки в целом отвечало бы закону Био-

Савара (т.е. только качение, без всякого относительного сдвига). При этом действие внешнего импульса уничтожается внутренним градиентом давления, связанным с неоднородным распределением завихренности.

В результате профиль давления в пределах вихря-решетки, представляющий из себя «яму» давления, постоянно меняет свою форму. Однако предельная форма, согласованная гидродинамическим образом (через закон Био-Савара) с внешним полем, как было показано выше, может установиться только через время запаздывания δt . В произвольном случае вихрь-решетка подвергается воздействию многочисленных внешних импульсов P_i , однако при этом всегда будет существовать время реакции вихря на внешнее возмущение δt_i .

Вышеизложенное в равной степени относится как к ламинарным, так и турбулентным течениям. Необходимо заметить, что вихревые слои рассматриваются здесь состоящими из вихрей-решеток различного диаметра, в общем случае последовательно вложенных один в другой. Это так называемые «материализованные» поверхности, т.е. поверхности разрыва, между которыми есть вихревой наполнитель, в отличие от «пустых» поверхностей разрыва, чаще всего употребляемых в анализе.

Для ламинарного вихревого слоя (рис.2,а) [1] характерно равенство давлений с обеих сторон в каждом нормальном сечении.

Таким образом, для этого слоя яма давления в любой момент воздействия со стороны внешнего потока будет иметь симметричный вид.

Это эквивалентно воздействию двух равных по величине, но противоположных по направлению нестационарных импульсов давления внешнего поля на границы ряда. Тогда вихрь-решетка будет испытывать симметричный сдвиг, приводящий к образованию двух симметричных сгущений завихренности, в результате поворота которых образуются внутренние градиентные поля, уравнивающие

(через время $\Delta t = \frac{\delta t}{2}$) внешние импульсы.

Важно подчеркнуть, что в результате присутствия двух концентрированных завихренностей, скорость вращения (леммы 1 и 2) увеличится ровно в два раза, что естественно приведет к увеличению частоты пульсаций ровно вдвое.

При этом интенсивность таких квадрупольных пульсаций ниже, чем интенсивность

дипольной пульсации, характеризующейся одной-сторонней концентрацией завихренности вдвое более медленного вращения.

Это вполне естественно, так как пульсации, имея противоположные направления взаимно погашают друг друга.

Необходимо отметить, что экспериментальные исследования [11] указывают на появление более слабых пульсаций удвоенной частоты в следе за плохообтекаемым телом.

Это еще одно из доказательств в пользу правильности лемм 1 и 2.

Следует подчеркнуть, что воздействия внешних импульсов на ламинарные вихри-решетки, вследствие их симметрии, не приводят к независимым перемещениям их центров завихренности, но движение целиком определяется полем градиентов давлений во внешнем течении, которое и создает определенную ориентацию движения. Вихрь реагирует на изменение внешнего поля, приходя через время запаздывания $\delta t/2$ в соответствии с ним.

Для турбулентного вихревого ряда (рис.2, б) [1] давления с двух сторон не равны.

В этом случае движение может быть разложено на два вида: на уже описанное выше, связанное с симметричным воздействием импульсов с обеих сторон и на движение, определяемое односторонним импульсом, связанным с разностью давлений по границам вихря (яма давлений имеет несимметричный вид).

Разность давлений может служить мерой интенсивности того или иного движения: при относительно небольшой ее величине превалирует первый вид движения, если же градиент давления велик, то основное значение имеет второй его вид.

Этот вид движения уже исследовался нами выше.

Он связан с появлением так называемого квазивихревого движения, т.е. односторонней концентрации завихренности. Центр вращения вихря перемещается независимо от движения внешнего поля, вследствие чего вихрь-решетка может двигаться против внешнего поля течения.

Поэтому, как указывалось выше, для турбулентного вихревого ряда характерна пронзаемость его струйками внешнего течения и связанный с вихрем поперечный перенос импульса.

Передача энергии, как для ламинарного, так и для турбулентного движения происходит следующим образом. Ударный импульс в месте его прохождения смещает одновременно все вихревые трубки, иерархию которых можно

определить через ряд вложения более мелких трубок в более крупные $(K - n) \subset \dots \subset (K - 1) \subset K \subset (K + 1) \subset \dots \subset (K + n)$. Однако для одной и той же вихревой трубки, например $(K - i)$, воздействие внешнего импульса и связанная с ним энергия будут различными, в зависимости от того, будет ли она принадлежать полю $(K - i)$ структур (трубок) или являться составляющим элементом $(K - i + 1)$ структуры и выше.

Это является следствием различных скоростей перемещений одних и тех же элементов в случае принадлежности их разным структурам и возникновения касательных сил, градиент которых велик в результате ударного сдвига.

Так как время запаздывания $\delta t_{(K-i)} < \delta t_{(K-i+1)} < \dots < \delta t_K$, то изменение энергии W (34), (35) будет продолжаться для $(K - i)$ структуры за счет ее принадлежности к более крупным вихревым трубкам при условии воздействия внешнего импульса.

В соответствии с принципом Аппеля возникающие касательные напряжения исчезают за время запаздывания, приводя к возникновению новой ямы давления внутри вихря-решетки, а значит и нового поля скоростей, отвечающего закону Био-Савара (чистое качение).

Формула (33) устанавливает связь этих сил с изменяющимся полем давления.

Касательные напряжения носят местный характер и экспоненциально убывают при удалении от границ вихря-решетки во внешний поток.

Это вытекает из того, что величина этих сил всегда связана с градиентом скоростей. Большие же градиенты скоростей могут существовать в вихре-решетке лишь в пространстве между составляющими его вихревыми трубками. «Радиус действий» таких сил вне вихря-решетки, в случае окружения ее решетками такого же типа, равен примерно радиусу этого вихря. Формула (22) составлена с учетом действия сил, опосредованным образом связанных с первым и третьим кинематическими членами.

Рассмотренные структуры вихревых образований типа вихрей-решеток находят свое подтверждение в астрофизике.

Так, известный астрофизик профессор А.Д.Чернин следующим образом объясняет возникновение вращающихся галактик [12]. «... В газовом протоскоплении возникают вихревые движения, вследствие чего в метagalacticкой среде образуются слои с турбулентностью, т.е. с внутренними вихревыми вращательными движениями.

Одной из причин возникновения завихренности является распространение возмущений (безвихревых), которые происходят из-за неоднородности в распределении плотности и температуры слоя вещества. У вихрей есть определенная иерархия: вихревые ядра (наиболее крупные вихри) поддерживают и снабжают энергией вихри меньших масштабов.

Энергия передается каскадным путем от немногих крупных вихрей к большому числу вихрей с меньшими размерами. В конце концов самые мелкие вихри расходуют свою энергию на преодоление вязкого трения. Оно переходит в энергию тепловых движений частиц».

Считается, что обособившиеся вихревые ядра образовали гигантские спирали, а вихри турбулентного каскада породили спиральные галактики меньших масс.

Выводы

В статье рассматриваются вопросы акустики, неразрывно связанные с движением вихревых структур. Анализ движения вихревых структур при воздействии на них внешнего импульса поля позволил, опираясь на принцип Аппеля, отметить ряд интересных особенностей, часть которых сформулирована в леммах 1 и 2. Большое значение для дальнейшего анализа имело введение нового параметра, характеризующего отклик вихревой системы на воздействие внешнего поля, так называемого времени запаздывания δt .

Список литературы

1. Пухлий В.А., Мирошниченко С.Т., Соколов В.В., Пухлий К.В. Гидродинамическая акустика. Сообщение 1. Структурный подход к уравнениям движения. – Энергетические установки и технологии: Научный журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2018, том 4, №4, с.29-42.
2. Пухлий В.А., Мирошниченко С.Т., Соколов В.В., Пухлий К.В. Гидродинамическая акустика. Сообщение 2. Турбулентное движение жидкости. – Энергетические установки и технологии: Научный журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2019, том 5, №1, с.
3. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. – М.-Л.: Гостехиздат, 1946. – 234 с.
4. Rayleigh J.W.S. Theory of sound. Vol.1-2. – New-York, Dover, 1945. – 676 с.
5. Powel A. Theory of vortex sound. – JASA, vol.36, №1, 1964, p.177-195.

6. Appel P. Jurnal für die reine und angewandte Mathematik. – Berlin-Leipzig, Band 133, Heft, 2, 1907, s.172-194.
7. Бетчелор Дж. Введение в динамику жидкости. – М.: Изд-во «Мир», 1973. – 380 с.
8. Хинце И.О. Турбулентность, ее механизмы и теория. – М.: Физматгиз, 1963. – 342 с.
9. Kelvin, William Thomson. Steps towards a kinetic theory of matter. – Brit. Ass. Rep., 1884, p.613-622.
10. Ламб Г. Гидродинамике. Пер. с англ. – М.: Гостеорлит, 1947. – 928 с.
11. Петров Г.И., Штейнберг Р.И. Исследование потока за плохо обтекаемыми телами. – Труды ЦАГИ, вып.482, 1940. – 20 с.
12. Чернин А.Д. Ранние стадии эволюции крупномасштабной метagalactic структуры. – Автореферат дисс. на соиск. учен. степени д-ра физ.-мат.наук. – Л., 1978. – 54 с.

References

1. Pukhliy V. A, Miroshnichenko S.T., Sokolov V.V., Pukhliy K.V. Hydrodynamic acoustics. The message 1. The structural approach to the movement equations. - Power installations and technologies: Scientific magazine. - Sevastopol: SSU, 2018, volume 4, №4, p.29-42.
2. Pukhliy V. A, Miroshnichenko S.T., Sokolov V.V., Pukhliy K.V. Hydrodynamic acoustics. The message 2. Turbulent movement of a liquid. - Power installations and technologies: Scientific magazine. - Sevastopol: SSU, 2019, volume 5, №1, p.
3. Blochinzev D.I. Acoustics of the non-uniform moving environment. – M.: Gostechizdat, 1946. – 234 p.
4. Rayleigh J.W.S. Theory of sound. Vol.1-2. – New-York, Dover, 1945. – 676 p.
5. Powel A. Theory of vortex sound. – JASA, vol.36, №1, 1964, p.177-195.
6. Appel P. Jurnal für die reine und angewandte Mathematik. – Berlin-Leipzig, Band 133, Heft, 2, 1907, s.172-194.
7. Betchelor J. Introduction in dynamics of a liquid. - M: Publishing house "World", 1973. - 380 p.
8. Hinze I.O. Turbulence, its mechanisms and the theory. - M: Fizmathgis, 1963. – 342 p.
9. Kelvin, William Thomson. Steps towards a kinetic theory of matter. – Brit. Ass. Rep., 1884, p.613-622.
10. Lamb G. Gidrodinamike. The lane with English - M: Gostchtheorlit, 1947. - 928 p.
11. Petrov G. I, Steinberg R. I. Stream research behind badly streamline bodies. - Works CAHI, rel.482, 1940. - 20 p.
12. Chernin A.D. Earl of a stage of evolution of large-scale metagalactic structure. – L., 1978. - 54 p.

УДК 539.3

Краевая задача Кармана для упругогогиба биметаллических трубопроводов атомной энергетики

В.А. Пухлий¹, Е.А. Коган², А.С. Мирошниченко,³ П.В. Пухлий⁴¹ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, 299015, Россия, pul611@rambler.ru² ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», ул. Б. Семеновская, 38, г. Москва, 107203, Россия, kogan_ea@mail.ru³ АО «Аэротекс», ул. Мурановская, 17-147, г. Москва, 297349, Россия

Статья поступила 09.09.2019 г.; после доработки 11.09.2019 г.

Аннотация

Проведен анализ напряженно-деформированного состояния гибов биметаллических трубопроводов гидроэнергетики с учетом овализации поперечного сечения. Дано аналитическое решение краевой задачи для упругогогиба на основе модифицированного метода последовательных приближений.

Ключевые слова: биметаллические трубопроводы, торообразные оболочки, гибы, задача Кармана, метод последовательных приближений.

Karman's boundary value problem for elastic bending of bimetallic pipelines of nuclear energy

V.A. Pukhliy¹, E.A. Kogan², A.S. Miroshnichenko³, P.V. Pukhliy⁴¹ Sevastopol state university, Kurchatova, 7 Sevastopol, 299015, Russia, pul611@rambler.ru² Moscow polytechnic university, B.Semenovskaya st., 38, Moscow, 107023, Russia³ Aerotex JSC, Muranovskaya st., 17-147, Moscow, 297349, Russia

Received 09.09.2019 y.; received in final form 11.09.2019 y.

Abstract

The analysis of the stress-strain state of bends of bimetallic pipelines of hydropower and nuclear energy, taking into account ovalization of the cross section, is carried out. An analytical solution of the boundary value problem for elastic bending is given based on the modified method of successive approximations.

Keywords: bimetallic pipelines, toroidal shells, bends, Karman problem, successive approximation method

Введение

Криволинейные участки трубопроводов (так называемые гибы труб) являются наиболее повреждаемыми элементами трубопроводных систем тепловых и атомных электрических станций.

Как известно, при изгибе трубы с криволинейной осью возникающие при этом продольные усилия приводят к сплющиванию поперечного сечения (овализации трубы) [1]. Этот эффект сопровождается уменьшением изгибной жестко-

сти и существенным изменением напряженного состояния трубы.

Определение напряженно-деформированного состояния (НДС)гиба трубы, в частности, его податливости является ключевой проблемой, определяющей длительность и точность расчета сложной трубопроводной системы.

Следует отметить, что первое решение этой задачи, поставленной Л. Прандтлем еще в 1906 году, и объяснение эффекта овализации было предложено Т. Карманом в 1911 г. [2].

Для решения задачи использовался вариационный метод Ритца, при этом компоненты перемещений представлялись в виде тригонометрических функций. Т. Карманом была предложена гипотеза о несжимаемости срединной поверхности поперечного сечениягиба, которая предопределяет однозначную связь между тангенциальными и радиальными перемещениями.

Допущение Кармана о постоянстве деформации вдоль изгибаемой трубы свело задачу о чистом изгибе трубы к осесимметричной задаче.

Следует отметить, что полученные Т.Карманом результаты существенно расходились с экспериментальными данными.

В работе [3], рассматривая отрезок трубы как часть замкнутой тороидальной оболочки, Е. Рейсснер и Р. Кларк привели решение задачи о плоском изгибе этой оболочки к системе 2-х дифференциальных уравнений, аналогичных уравнения Рейсснера и Мейсснера для осесимметричного изгиба оболочек.

В дальнейшем для решения полученной системы уравнений применялся метод асимптотического интегрирования, позволивший получить простые расчетные формулы.

В работах Э.Л. Аксельрада и В.П.Ильина [1,4] было показано, что в результате действия изгибающего момента при овализации трубы возникают не только продольные изгибные напряжения, но и нормальные окружные напряжения, которые могут значительно превышать продольные изгибные напряжения (что противоречит решению для прямой трубы).

Реальные условия закрепления концевых сечений криволинейной трубы могут существенно изменить напряжения и жесткость трубы и, по видимому, впервые были исследованы в работах Э.Л. Аксельрада [5, 6] и В.П.Ильина [7].

Обзор ранних работ в этой области дан в монографиях Э.Л. Аксельрада [5], А.С. Вольмира [9]. Отметим также работы Орыняка [10,11], Д.Л. Костовецкого [12] и работы [13-15], в которых были разработаны различные подходы, показывающие хорошие совпадения результатов.

В работе [16] исследовалось НДСгиба трубы с фланцами на концах на основе полученной системы дифференциальных уравнений в перемещениях, учитывающих изменение формы в процессе деформации, методом разложения искомых функций в тригонометрические ряды.

В настоящей работе в развитие [16] исследуется напряженно-деформированное состояние гибов биметаллических тороидальных оболочек,

применительно к системам трубопроводов гидроэнергетики.

Приведена полная система геометрических соотношений, определяющих дифференциальную геометрию поверхности спая биметаллических торообразных оболочек, а также их напряженно-деформированное состояние.

Показана возможность применения разработанного В.А. Пухлием [17,18] модифицированного метода последовательных приближений к решению задачи.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является изучение проблемы напряженно-деформированного состояния трубопроводов гидроэнергетики, в частности гибов.

При деформации гибов трубопроводов происходит овализация круглого сечения. В теоретическом плане это приводит к решению краевой задачи Кармана для трубопроводов с учетом овализации поперечного сечения.

Основные уравнения биметаллических тороидальных оболочек

Следуя Э.И. Григолюку [19], запишем уравнения равновесия элемента осесимметричной биметаллической оболочки при малых смещениях поверхности спая оболочки (рис.1).

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\alpha}(N_1 R_2 \sin \alpha) - N_2 R_1 \cos \alpha - Q_1 R_2 \sin \alpha + \\ + p_x R_1 R_2 \sin \alpha = 0, \\ \frac{d}{d\alpha}(Q_1 R_2 \sin \alpha) + N_1 R_2 \sin \alpha + N_2 R_1 \sin \alpha + \\ + p_2 R_1 R_2 \sin \alpha = 0, \\ \frac{d}{d\alpha}(M_1 R_2 \sin \alpha) - M_2 R_1 \cos \alpha - Q_1 R_1 R_2 \sin \alpha = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь M_1 , M_2 – соответственно удельный меридиональный и кольцевой изгибающие моменты; N_1 , N_2 – удельные меридиональная и кольцевая нормальные силы; Q_1 – удельная меридиональная поперечная сила; R_1 – радиус кривизны меридиана поверхности спая; R_2 – второй главный радиус кривизны; p_x и p_z – составляющие внешней поверхности нагрузки на касательную и нормаль к поверхности спая; α – угол между нормалью к поверхности спая и осью вращения.

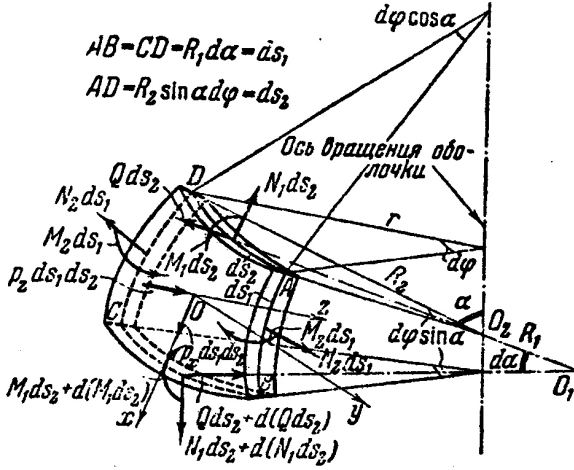


Рис.1. Элемент осесимметричной биметаллической оболочки.

Физические соотношения, связывающие изгибающие моменты и нормальные силы с деформациями поверхности сая ε_1 и ε_2 и параметрами изменения кривизн κ_1 и κ_2 , имеют вид:

$$M_1 = C_1\varepsilon_1 + C_2\varepsilon_2 - D_1\kappa_1 - D_2\kappa_2,$$

$$M_2 = C_2\varepsilon_1 + C_1\varepsilon_2 - D_2\kappa_1 - D_1\kappa_2,$$

$$N_1 = B_1\varepsilon_1 + B_2\varepsilon_2 - C_1\kappa_1 - C_2\kappa_2,$$

$$N_2 = B_2\varepsilon_1 + B_1\varepsilon_2 - C_2\kappa_1 - C_1\kappa_2.$$

Здесь

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{R_1} \left(\frac{du}{d\alpha} \sin \alpha + \frac{dw}{d\alpha} \cos \alpha \right), \quad \varepsilon_2 = \frac{w}{R_2 \sin \alpha},$$

$$\vartheta = \frac{1}{R_1} \left(\frac{du}{d\alpha} \cos \alpha - \frac{dw}{d\alpha} \sin \alpha \right),$$

$$\kappa_1 = \frac{1}{R_1} \frac{d\vartheta}{d\alpha}, \quad \kappa_2 = \frac{\vartheta}{R_2} \operatorname{ctg} \alpha.$$

При этом

$$B_1 = \frac{E_1 h_1}{1 - \mu_1^2} + \frac{E_2 h_2}{1 - \mu_2^2},$$

$$B_2 = \mu_1 \frac{E_1 h_1}{1 - \mu_1^2} + \mu_2 \frac{E_2 h_2}{1 - \mu_2^2},$$

$$C_1 = \frac{E_1 h_1^2}{2(1 - \mu_1^2)} - \frac{E_2 h_2^2}{2(1 - \mu_2^2)},$$

$$C_2 = \frac{E_1 h_1^2 \mu_1}{2(1 - \mu_1^2)} - \frac{E_2 h_2^2 \mu_2}{2(1 - \mu_2^2)},$$

$$D_1 = \frac{E_1 h_1^3}{3(1 - \mu_1^2)} + \frac{E_2 h_2^3}{3(1 - \mu_2^2)},$$

$$D_2 = \frac{E_1 h_1^3 \mu_1}{3(1 - \mu_1^2)} + \frac{E_2 h_2^3 \mu_2}{3(1 - \mu_2^2)},$$

u , w – соответственно перемещение вдоль оси вращения и по нормали к ней; E_k , h_k , μ_k – соответственно модуль упругости, толщина и коэффициент Пуассона k -го слоя ($k = 1, 2$).

Следует отметить, что из уравнений (1) можно получить основные уравнения теории однородных осесимметричных оболочек Е. Мейснера [20].

Подчеркнем, что при $\lambda_2 = \psi_2 = 0$, т.е. когда коэффициенты Пуассона слоев одинаковы ($\mu_1 = \mu_2 = \mu$), уравнения осесимметричных биметаллических оболочек разрешимы, если разрешимы соответствующие уравнения однородных оболочек.

Геометрические параметрыгиба биметаллического трубопровода

Для торообразной биметаллической оболочки (см. рис. 2) введем систему криволинейных координат ξ, θ, ζ . Координата $-h/2 \leq \zeta \leq h/2$ отсчитывается по нормали к срединной поверхности.

Как видно из рис. 2, линии $\xi = \frac{x}{r} = \alpha_1$ являются окружностями радиуса $R(\theta)$, получающимися сечением тора плоскостями, перпендикулярными оси симметрии (параллели), а линии $\theta = \frac{s_2}{r} = \alpha_2$ – окружности радиуса r (меридианы).

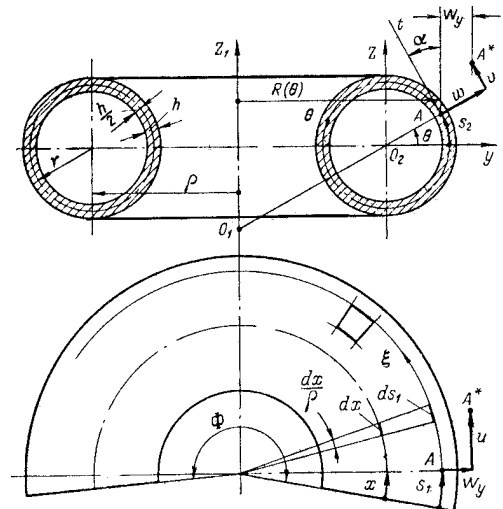


Рис.2. Тороидальная оболочка сечения.

Длины дуг, отсчитываемые вдоль координатных линий, равны

$$ds_1 = A_1 d\alpha_1, \quad ds_2 = A_2 d\alpha_2, \quad ds_3 = A_3 d\zeta,$$

где $A_1, A_2, A_3 = 1$ - коэффициенты Ламе.

Очевидно, прямоугольные декартовы координаты произвольной точки A связаны с криволинейными координатами точки A соотношениями

$$\begin{aligned} x &= R(\theta) \cos \xi = (\rho + r \cos \theta) \cos \xi = \\ &= (\rho + r \cos \alpha_2) \cos \alpha_1, \\ y &= R(\theta) \sin \xi = (\rho + r \cos \theta) \sin \xi = \\ &= (\rho + r \cos \alpha_2) \sin \alpha_1, \\ z &= r \sin \theta = r \sin \alpha_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Следовательно, для введенной криволинейной системы координат выполняются условия ортогональности [21]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial \alpha_1} \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial y}{\partial \alpha_1} \frac{\partial y}{\partial r} + \frac{\partial z}{\partial \alpha_1} \frac{\partial z}{\partial r} &= 0, \\ \frac{\partial x}{\partial \alpha_2} \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial y}{\partial \alpha_2} \frac{\partial y}{\partial r} + \frac{\partial z}{\partial \alpha_2} \frac{\partial z}{\partial r} &= 0, \\ \frac{\partial x}{\partial \alpha_1} \frac{\partial x}{\partial \alpha_2} + \frac{\partial y}{\partial \alpha_1} \frac{\partial y}{\partial \alpha_2} + \frac{\partial z}{\partial \alpha_1} \frac{\partial z}{\partial \alpha_2} &= 0. \end{aligned}$$

Поэтому первая квадратичная форма поверхности спая торообразной оболочки будет равна

$$\begin{aligned} I &= ds^2 = a_{11} d\xi^2 + 2a_{12} d\xi d\theta + a_{22} d\theta^2 = \\ &= A_1^2 d\alpha_1^2 + A_2^2 d\alpha_2^2. \end{aligned}$$

При этом параметры Ламе, определяемые в общем случае по формуле

$$A_i = \left| \frac{\partial \vec{r}}{\partial q_i} \right| = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial q_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial q_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial q_i} \right)^2},$$

где $\vec{r} = \vec{r}(q_1, q_2, q_3) = \vec{r}(\xi, \theta, \zeta)$ - радиус-вектор произвольной точки A , с учетом формул (2) будут равны

$$A_1 = \rho \left(1 + \frac{r}{\rho} \cos \alpha_2 \right), \quad A_2 = r. \quad (3)$$

$$b_{11} = \frac{1}{\sqrt{a_{11}a_{22}}} \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial \alpha_1^2} \cdot \frac{\partial \vec{r}}{\partial \alpha_1} \cdot \frac{\partial \vec{r}}{\partial \alpha_2} = \frac{1}{\sqrt{a_{11}a_{22}}} \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_1^2} & \frac{\partial^2 y}{\partial \alpha_1^2} & \frac{\partial^2 z}{\partial \alpha_1^2} \\ \frac{\partial x}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial y}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial z}{\partial \alpha_1} \\ \frac{\partial x}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial y}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial z}{\partial \alpha_2} \end{vmatrix} = \rho \left(1 + \frac{r}{\rho} \cos \alpha_2 \right) \cos \alpha_2,$$

Из рис. 2 видно, что один из центров кривизны O_1 лежит на оси симметрии, другой O_2 - в центре сечения. Поэтому по теореме Менье первый главный радиус кривизны равен

$$R_1 = \frac{R}{\cos \alpha} = \frac{\rho + r \cos \theta}{\cos \alpha}, \quad (4)$$

а второй главный радиус кривизны

$$R_2 = r. \quad (5)$$

Легко убедиться в том, что полученные выражения (3 - 5) удовлетворяют соотношениям Петерсона-Кодацци-Гаусса [8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{A_2}{R_2} \right) &= \frac{1}{R_1} \frac{\partial A_2}{\partial \xi}, & \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{A_1}{R_1} \right) &= \frac{1}{R_2} \frac{\partial A_1}{\partial \theta}, \\ \frac{1}{R_1 R_2} &= -\frac{1}{A_1 A_2} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{A_1} \frac{\partial A_2}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{A_2} \frac{\partial A_1}{\partial \theta} \right) \right]. \end{aligned}$$

Радиусы кривизны R_1, R_2 определяют углы между гранями элемента оболочки в плоскостях, ортогональных срединной поверхности. В плоскости, касательной к срединной поверхности, углы между гранями элемента будут определяться значениями $\frac{ds_1}{R_{13}}$ и $\frac{ds_2}{R_{23}}$, где R_{13}, R_{23} -

радиусы кривизны, равные для торообразной оболочки с круговым меридиональным сечением [9]

$$R_{13} = \frac{R}{\sin \alpha}, \quad R_{23} = \infty.$$

Зная главные радиусы кривизны, можно определить вторую квадратичную форму,

$$II = b_{11} d\xi^2 + 2b_{12} d\xi d\theta + b_{22} d\theta^2,$$

коэффициенты которой характеризуют нормальную кривизну координатных линий, а b_{12} - параметр кручения поверхности [22].

В принятых обозначениях с учетом соотношений (2) они определяются по формулам:

$$b_{12} = \frac{1}{\sqrt{a_{11}a_{22}}} \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_2} \cdot \frac{\partial \vec{r}}{\partial \alpha_1} \cdot \frac{\partial \vec{r}}{\partial \alpha_2} = \frac{1}{\sqrt{a_{11}a_{22}}} \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_2} & \frac{\partial^2 y}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_2} & \frac{\partial^2 z}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_2} \\ \frac{\partial x}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial y}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial z}{\partial \alpha_1} \\ \frac{\partial x}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial y}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial z}{\partial \alpha_2} \end{vmatrix} = 0,$$

$$b_{22} = \frac{1}{\sqrt{a_{11}a_{22}}} \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial \alpha_2^2} \cdot \frac{\partial \vec{r}}{\partial \alpha_1} \cdot \frac{\partial \vec{r}}{\partial \alpha_2} = \frac{1}{\sqrt{a_{11}a_{22}}} \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 x}{\partial \alpha_2^2} & \frac{\partial^2 y}{\partial \alpha_2^2} & \frac{\partial^2 z}{\partial \alpha_2^2} \\ \frac{\partial x}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial y}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial z}{\partial \alpha_1} \\ \frac{\partial x}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial y}{\partial \alpha_2} & \frac{\partial z}{\partial \alpha_2} \end{vmatrix} = r.$$

Заметим, что в сечении торообразной оболочки плоскостью, параллельной оси тора и отстоящей от оси симметрии на расстояние, равное радиусу образующей окружности, получается овал Кассини (см. рис.3).

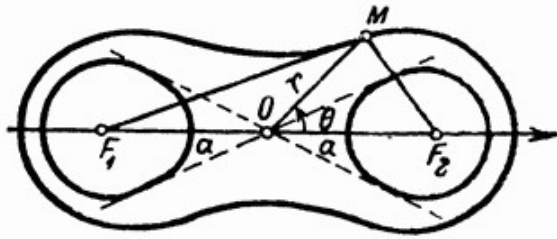


Рис.3. Овал Кассини.

Эта кривая определяется как геометрическое место точек M , для которых произведение расстояний от двух данных точек $F_1(-c;0)$ и $F_2(c;0)$ (фокусов) есть величина постоянная: $\overline{F_1M} \cdot \overline{F_2M} = b^2$.

В прямоугольных координатах уравнение овала Кассини

$$(x^2 + y^2)^2 - 2c^2(x^2 - y^2) = b^4 - c^4.$$

При $b \geq c\sqrt{2}$ овал Кассини – овальная кривая при $c < b < c\sqrt{2}$ – кривая «с талией» при $b = c$ – лемниската Бернулли при $b < c$ – два овала (см. рис.4).

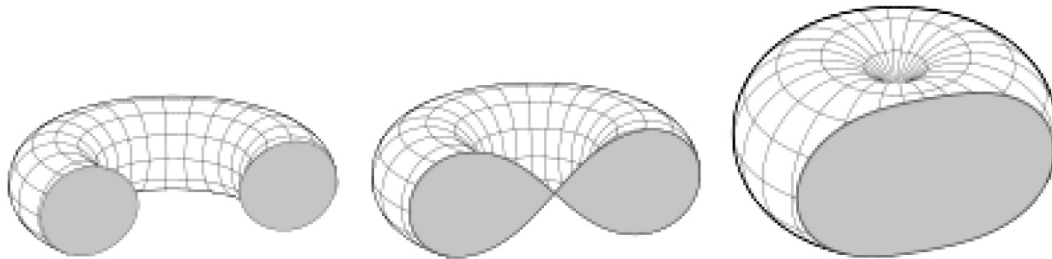


Рис.4. Сечения тора.

Уравнение овала Кассини в полярной системе (O — полюс, OX - полярная ось):

$$r^4 - 2c^2 r^2 \cos 2\theta + c^4 - b^4 = 0,$$

$$\text{где } r^2 = x^2 + y^2, \quad \cos \theta = \frac{x}{r}, \quad \sin \theta = \frac{y}{r}.$$

Радиус кривизны кривой находится по формуле:

$$R = \frac{2b^2 r^3}{c^4 - b^4 + 3r^4} = \frac{b^2 r}{r^2 + c^2 \cos 2\theta}.$$

Так как деформирование поперечных сечений в областигиба сопровождается существен-

ным уменьшением жесткости, то анализ основного напряженного состояния при изгибе криволинейных труб и стержней открытого сечения может быть выполнен на основе гипотез и уравнений полубезмоментной теории В.З. Власова [23,7,8]

$$\frac{\partial N_1}{\partial \xi} + \frac{\partial S}{\partial \theta} + r q_1 = 0,$$

$$\frac{\partial S}{\partial \xi} + \frac{\partial N_2}{\partial \theta} + \frac{N_1}{R_{13}} + \frac{r}{R_2} Q_2 + r q_2 = 0,$$

$$\begin{aligned} \frac{r}{R_1} N_1 + \frac{r}{R_2} N_2 - \frac{\partial Q_2}{\partial \theta} - r q_u &= 0, \\ \frac{\partial M_1}{\partial \xi} + \frac{\partial H}{\partial \theta} - r Q_1 &= 0, \\ \frac{\partial M_2}{\partial \theta} - r Q_2 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнения (6) являются уравнениями линейной теории. Они не учитывают влияние деформациигиба трубы на расположение внутренних сил. Они также не позволяют произвести учет влияния внутреннего давления p_0 на жесткость трубы.

Учет деформации контура поперечного сечениягиба трубы

Составим условия равновесия элемента оболочки, учитывающие изменение его формы в процессе деформации трубы. Для этого дополним уравнения (6).

Прежде всего, необходимо заменить в уравнениях (6) радиусы кривизны нормальных сечений R_1 и R_2 и радиус R_{13} их значениями после деформации R_1^* , R_2^* , R_{13}^* , что отразит изгиб элемента оболочки.

Кроме того, необходимо учесть деформацию кручения элемента, характеризуемого параметром τ . При условии, что A_1 , $A_2 \approx \text{const}$, получим:

$$\tau = \frac{\partial \vartheta_1}{A_2 \partial \alpha_2} = \frac{\partial \vartheta_2}{A_1 \partial \alpha_1}.$$

После внесения дополнений, учитывающих изменение формы трубы при изгибе и кручении, уравнения (6) для элемента оболочки, находящегося в деформированном состоянии, переписываются в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} + \frac{\partial S}{\partial \theta} + r Q_2 \tau + r q_1 &= 0, \\ \frac{\partial S}{\partial \xi} + \frac{\partial N_2}{\partial \theta} + \frac{N_1}{R_{13}^*} + \frac{r}{R_2^*} Q_2 + r q_2 &= 0, \\ \frac{r}{R_1^*} N_1 + \frac{r}{R_2^*} N_2 - \frac{\partial Q_2}{\partial \theta} + 2r S \tau - r q_z &= 0, \\ \frac{\partial M_1}{\partial \xi} + \frac{\partial H}{\partial \theta} - r Q_1 &= 0, \quad \frac{\partial M_2}{\partial \theta} - r Q_2 = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь величины Q_1 и $S_1 = S_2 = S$ в первых трех уравнениях отбрасываются.

Уравнения (7) являются нелинейными, поскольку включают произведения усилий на

кривизну и кручение деформированной координатной поверхности $Q_2 \tau$, $S \tau$. Неизвестные параметры деформации оболочки содержат величины R_1^* , R_2^* , R_{13}^* .

Уравнения (7) могут быть упрощены при отбрасывании членов, нелинейных относительно неизвестных функций, но в то же время, при сохранении членов, нелинейных относительно параметров нагрузки: изгибающего момента M_0 и поперечного давления p_0 (физическая нелинейность).

Основная часть геометрической нелинейности деформации изгиба криволинейной части (гиба) трубы является следствием изменения эффекта Кармана в результате изменения кривизны оси.

В результате исходной деформации поперечное сечение трубы остается круговым $R_2^0 = R_r = r$, а кривизна оси изменяется от $1/\rho$ до $1/\rho^0$, но остается постоянной вдоль трубы

$$\frac{1}{R_1^0} = \frac{\cos \theta}{\rho^0} = \left(\frac{1}{\rho} + \frac{M}{EI} \right) \cos \theta. \quad (8)$$

Компоненты деформации будем рассматривать состоящими из двух частей: первая их часть определяется в предположении недеформированности поперечных сечений, а вторую часть составляют компоненты, возникающие в результате деформации контура сечений.

Тогда кривизну ε_0 продольной осигиба трубы после приложения нагрузки, вычисляемую без учета деформации контура, (назовем ее исходной):

$$\varepsilon_0 = \alpha r \cos \theta \quad (9)$$

можно вычислить с учетом (8) по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{\rho^0} - \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI}. \quad (10)$$

Полное относительное удлинение продольных волокон ε_1 , определяется в виде суммы удлинений: исходного ε_0 и удлинения, вызванного деформацией поперечных сечений

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 + \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{r}{\rho_0} W_y. \quad (11)$$

В выражении (11) относительное удлинение продольных волокон, вызванное их перемещением в плоскости кривизны оси трубы (эффектом Кармана), учтено слагаемым $\frac{r}{\rho_0} W_y$,

где

$$W_y = w \cos \theta - v \sin \theta - W_y^0, \quad (12)$$

где W_y^0 - смещение сечения трубы как жесткого целого.

Здесь и далее все компоненты перемещений (u, v, w, W_y) описывают только часть деформации трубы, связанную с изменением формы поперечных сечений.

Принимая в соответствии с допущениями полубезмоментной теории, что относительное удлинение в окружном направлении и сдвиг срединной поверхности малы по сравнению с соответствующими производными, соотношения между деформациями и перемещениями можно записать в обычном для линейной теории оболочек виде:

$$\frac{\partial v}{\partial \theta} + w = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial \xi} = 0; \quad \vartheta = -\vartheta_2 = \frac{\partial w}{\partial \theta} - v. \quad (13)$$

$$\alpha_1 = -\frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2}; \quad \alpha_2 = -\frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta}; \quad \tau = -\frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial \xi}. \quad (14)$$

Исключим из уравнений равновесия (7) усилия N_2, Q_2, S и учтем, что при заданной нагрузке (момент M и внутреннее давление интенсивностью p) составляющие q_1, q_2 и q имеют значение: $q_1 = q_2 = 0; q_n = p_0$.

В результате получим уравнение, содержащее лишь 2 неизвестные величины N_1 и M_2 :

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 N_1}{\partial \xi^2} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\tau \frac{\partial M_2}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{R_2^*}{R_1^*} N_1 \right) - \\ & - \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{R_2^*}{r^2} \frac{\partial^2 M_2}{\partial \theta^2} \right) - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{r}{\rho^0} \sin \theta \cdot N_1 \right) - \\ & - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{R_2^*} \frac{\partial^2 M_2}{\partial \theta} \right) - \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (R_2^* p) = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

В уравнение (15) вошли радиусы кривизны и кручение деформированной срединной поверхности трубы, которые связаны с исходной кривизной следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_1^*} &= \frac{\cos \theta}{\rho^0} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2}; & \frac{1}{R_2^*} &= \frac{1}{r} \left(1 - \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta} \right); \\ \frac{r}{\rho^0} \sin \theta &= R_{13}^0 \approx R_{13}^*. \end{aligned} \quad (16)$$

Решая в дальнейшем задачу в перемещениях, используем соотношение между деформациями и перемещениями (10) – (14) и соотношения упругости. Подставляя затем эти соотношения и выражения (16) в уравнение (15), получим линейное уравнение в перемещениях следующего вида:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^3 u}{\partial \xi^3} + \frac{r}{\rho^0} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{\partial u}{\partial \xi} \cos \theta \right) - \frac{r}{\rho^0} \frac{\partial u}{\partial \xi} \sin \theta + \\ & + \frac{r}{\rho^0} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} (w \cos \theta - v \sin \theta) + \\ & + \left(\frac{r}{\rho^0} \right)^2 \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(w \cos^2 \theta - \frac{1}{2} v \sin 2\theta \right) - \\ & - \left(\frac{r}{\rho^0} \right)^2 \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{2} w \sin 2\theta - v \sin^2 \theta \right) - \\ & - k_v^2 \frac{\partial^3}{\partial \theta^3} \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial \theta^2} - 1 \right) - \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \varepsilon_0 \right) + \\ & + \frac{r}{\rho^0} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left[\varepsilon_0 \left(\vartheta \sin \theta + \frac{\partial \vartheta}{\partial \theta} \cos \theta \right) \right] - \\ & - \frac{r}{\rho^0} \frac{\partial}{\partial \theta} (\varepsilon_0 \sin \theta) + \frac{r}{\rho^0} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (\varepsilon_0 \cos \theta) - \\ & - r \frac{p}{Eh} \frac{\partial^3 \vartheta}{\partial \theta^3} = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь ε_0 – исходная деформация, определяемая выражением (9); k_v – безразмерный параметр толщины стенки трубы: $k_v = h/c_v r$; $c_v = \sqrt{12(1-\nu^2)}$.

Уравнение (17) содержит 4 неизвестные функции: перемещения u, v, w и угол поворота ϑ . Присоединив к нему 3 уравнения (13), связывающие u, v, w и ϑ , получим замкнутую систему уравнений в перемещениях.

Получающиеся при интегрировании полученной системы 4-х дифференциальных уравнений в частных производных произвольные постоянные интегрирования находятся из граничных условий задачи.

Решение краевой задачи

К решению краевой задачи применим метод разложения неизвестных функций в тригонометрические ряды по окружной координате θ . В этом случае для каждого члена разложения выполняются условия периодичности по координате θ .

Граничные условия на концах трубы удовлетворяются за счет переменных коэффициентов разложений, представляющих собой функции продольной координаты ξ .

Представим радиальную составляющую перемещения w в виде ряда:

$$w = \sum_n f_n(\xi) \cos n\theta, \quad n = 1, 2, \dots \quad (18)$$

Здесь $f_n(\xi)$ – подлежащие определению функции продольной координаты ξ .

Основные компоненты перемещения и угол поворота запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} u &= -\sum_n \frac{1}{n^2} f'_n(\xi) \cos n\theta; \\ v &= -\sum_n \frac{1}{n} f_n(\xi) \sin n\theta, \quad n = 1, 2, \dots; \\ \vartheta &= -\sum_n \frac{n^2 - 1}{n} f_n(\xi) \sin n\theta; \\ W_y &= \frac{1}{2} \sum_n \left(f_{n+1} \frac{n+2}{n+1} + f_{n-1} \frac{n-2}{n-1} \right) \cos n\theta. \end{aligned} \quad (19)$$

Здесь W_y – компоненты перемещения, описывающие часть деформации трубы, связанную с изменением формы поперечных сечений (эффект Кармана) определяются по формуле (12).

Подставляя разложения компонентов перемещения u , v , w и поворот ϑ (18)–(19) в уравнение равновесия (17), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений, определяющих функции $f_n(\xi_0)$, где $\xi_0 = \xi \sqrt{k_v}$.

После этой подстановки приведем левую часть уравнения (17) к виду ряда Фурье. Поскольку левая часть уравнения равна нулю, должны быть равны нулю все коэффициенты упомянутого ряда при $\cos \theta$, $\cos 2\theta$, $\cos 3\theta$, что даст в результате бесконечную систему обыкновенных дифференциальных уравнений 4-го порядка относительно неизвестных функций $f_n(\xi_0)$:

$$\begin{cases} f_1^{IV}(\xi_0) - \left(\frac{3}{4} \mu + \frac{M^0}{2} \right) f_2''(\xi_0) = 0; \\ a_{n,n-2} f_{n-2}(\xi_0) + a_{n,n-1} f_{n-1}''(\xi_0) + f_n^{IV}(\xi_0) + \\ + a_n f_n(\xi_0) + a_{n,n+1} f_{n+1}''(\xi_0) + a_{n,n+2} f_{n+2}(\xi_0) = P \delta_{2n}. \end{cases}$$

Индексы n будут принимать следующие значения:

$$\begin{aligned} n &= 2, 3, 4, \dots; \\ \delta_{2n} &= \begin{cases} 1 & \text{при } n = 2; \\ 0 & \text{при } n \neq 2. \end{cases} \end{aligned}$$

Переменная ξ_0 будет изменяться в следующих пределах:

$$-l_0 \leq \xi_0 \leq l_0, \quad \text{где } l_0 = \sqrt{k_v} \frac{L}{2r}.$$

Отметим, что для нахождения неизвестных функций $f_n(\xi_0)$ бесконечную систему необходимо заменить усеченной системой, состоящей из конечного числа уравнений. Такая замена соответствует сохранению конечного числа n членов в разложениях (18)–(19). Исследования, проведенные рядом авторов, показали, что ряды (18)–(19) обладают хорошей сходимостью, и для получения хороших результатов при $\mu < 10$ достаточно в них сохранить три члена, не считая $n = 1$, т.е. $n = 2, 3, 4$.

Усеченную систему обыкновенных дифференциальных уравнений, в общем случае с переменными коэффициентами запишем в виде:

$$\begin{cases} f_2^{IV} + a_2 f_2 + a_{23} f_3'' + a_{24} f_4 = P; \\ f_3^{IV} + a_{32} f_2'' + a_3 f_3 + a_{34} f_4'' = 0; \\ f_4^{IV} + a_{42} f_2 + a_{43} f_3'' + a_4 f_4 = 0. \end{cases} \quad (20)$$

Система уравнений (20) представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений 12-го порядка.

В настоящей работе к интегрированию системы уравнений (20) применяется аналитический подход, основанный на использовании модифицированного метода последовательных приближений В.А. Пухлия [17–18].

Применение модифицированного метода последовательных приближений

Предварительно представим систему дифференциальных уравнений (20) 12-го порядка в нормальной форме Коши. Запишем систему уравнений (20) следующим образом:

$$\frac{dX_m}{d\xi} = \sum_{v=1}^s B_{v,m} X_v + f_m, \quad m = 1, 2, \dots, s. \quad (21)$$

К решению системы уравнений (21) далее применяем модифицированный метод последовательных приближений в смещенных полиномах Чебышева [17, 18].

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

$$\begin{aligned} B_{v,m} &= \sum_{r=0}^q b_{v,m,r} d_r^{-1} \sum_{k=0}^r a_k T_k^*(\xi), \\ f_m &= \sum_{r=0}^q f_{m,r} (d_r \cdot r!)^{-1} \sum_{k=0}^r a_k T_k^*(\xi). \end{aligned} \quad (22)$$

Здесь q – степень интерполяционного полинома; a_k – коэффициенты разложения ξ^r в ряд по многочленам Чебышева $T_k^*(\xi)$. В выра-

жениях (22) $d_r = 1$ для $r = 0$ и $d_r = 2^{2r-1}$ для остальных r .

Общее решение системы уравнений (21) имеет вид [17, 18]:

$$X_m = \sum_{\mu=1}^s C_{\mu} \left[d_0^{-1} a_0 T_0^*(\xi) \delta + \sum_{n=1}^{\infty} X_{m,\mu,n} \right] + \sum_{j=0}^q t_{m,j,0} [d_{j+1}(j+1)!]^{-1} \sum_{k=0}^{j+1} a_k T_k^*(\xi) + \sum_{n=2}^{\infty} X_{m,n}, \quad (23)$$

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

В решении (23) будет $\delta = 1$, если $m = \mu$ и $\delta = 0$ для остальных μ . Первое приближение $X_{m,\mu,1}$ получается из подстановки нулевого приближения: $d_0^{-1} a_0 T_0^*(\xi) \delta$ в правую часть однородной системы:

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

Последующие приближения осуществляются по формулам:

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

$$X_{m,n} = \sum_{j=1}^{\beta} t_{m,n,j} [d_{n+j-1}(n+j-1)!]^{-1} \sum_{k=0}^{n+j-1} a_k T_k^*(\xi), \quad (24)$$

где $\beta = n(q+3) - 2$.

Отметим, что системы фундаментальных функций (24) являются равномерно сходящимися рядами, при этом коэффициенты $t_{m,\mu,n,j}$ и $t_{m,n,j}$ определяются через коэффициенты предыдущего приближения по рекуррентным формулам:

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

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

Постоянные C_{μ} , входящие в общее решение (23), находятся из граничных условий.

Заключение

Изложен алгоритм исследования напряженно-деформированного состояния гибов биметаллических тороидальных оболочек применительно к системам трубопроводов гидроэлектростанций.

Приведена полная система геометрических и деформационных соотношений, определяющих дифференциальную геометрию поверхности спая биметаллических торообразных оболочек, а также их напряженно-деформированное состояние.

Предложен аналитический подход, разработанный проф. В.А.Пухлий и изложенный им в академической печати [17, 18], к расчету прочности и жесткости гибов трубопроводов, основанный на применении модифицированного метода последовательных приближений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и города Севастополя в рамках научного проекта №18-48-920002.

Список литературы

1. Аксельрад Э.Л. Расчет трубопроводов / Э.Л. Аксельрад, В.П. Ильин. - Л.: Машиностроение, 1970. - 240 с.
2. Karman T. Über die Formänderung dünnwandiger Rohre, insbesondere Ansgleichrohre / T. Karman // VDI Zeitschrift. - 1911. - Vol. 55. - №45. - S. 1889-1895.
3. Clark R. Bending of curved tubes / R. Clark, E. Reissner // Advances in Applied Mechanics. - 1951. - Vol. 2. - 93 p.
4. Аксельрад Э.Л. Гибкие оболочки / Э.Л. Аксельрад. - М.: Изд-во «Наука». Глав. Ред. Физ.-мат. лит-ры, 1976. - 376 с.
5. Аксельрад Э.Л. Тонкостенные криволинейные стержни и трубы / Э.Л. Аксельрад // Сб. «Исследования по строительной механике». Труды ЛИИЖТ. 1966. - Вып. 249. - С. 147-168.
6. Аксельрад Э.Л. Уточнение верхней критической нагрузки изгиба трубы с учетом докритической деформации / Э.Л. Аксельрад // Изв. АН СССР, МТТ. - 1967. - №2.
7. Ильин В.П. Об изгибе кривых тонкостенных труб / В.П. Ильин // Тр. Ленингр. инж. - строит. ин-та. - 1966. - Вып. 49. - С. 201-230.
8. Ильин В.П. К расчету криволинейных биметаллических труб / В.П. Ильин // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. - 1973. - № 5. - С. 152-159.
9. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем / А.С. Вольмир. - М.: Наука, 1967. - 984 с.
10. Orynyak I.V. First approximation to elastic analysis of end-effects in pipe bends / I.V. Orynyak //

- Int. Journ. of Pressure Vessels and Piping. – 2002. - Vol.79. - №2. - P. 157-164.
11. Орыняк И.В. Решение для упругогогиба трубы на основе гипотезы плоских сечений / И.В. Орыняк // Вестник НТУ «КПИ». Машиностроение – 2002. - Вып.43. - С. 60-67.
12. Костовецкий Д.Л. Прочность трубопроводных систем энергетических установок / Д.Л. Костовецкий. - Л.: Изд-во «Энергия», 1973. – 264 с.
13. Meckenzie D., Bell R.A. A simple pipe bend element for piping flexibility analysis / D. Meckenzie, R.A.Bell // Int. Journ. of Pressure Vessels and Piping. -1992. - Vol.51. - №1. - P.85-106.
14. Ohtsubo H., Watanabe O. Flexibility and stress factors of pipe bends - an analysis by finite ring method /H. Ohtsubo, O. Watanabe // Trans. ASME. – Journ. Pressure Vessel Tech. – 1977. - Vol.99. - P. 281-290.
15. Bathe K.J., Almeida C.A. A simple and effective pipe elbow element – linear analysis / K.J.Bathe, C.A. Almeida // Trans. ASME. J. Appl. Mech. – 1980. - Vol.47. P.93-100.
16. Пухлий В.А. Об одной краевой задаче для упругогогиба трубопроводов АЭС / В.А. Пухлий, Л.О. Наголюк, Л.В. Кутовой, Л.Н. Пичугова, А.В. Чулкина, В.П. Галенина // Теория механизмов и машин (ТММ). – 2014. – Т. 12 - №2(24). - С.1-14.
17. Пухлий В.А. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений / В.А. Пухлий // Журнал вычисл. матем. и матем. физики. - 1978. Т. 18. - №5 - С. 1275-1282.
18. Пухлий В.А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики / В.А. Пухлий // Дифференциальные уравнения. – 1979. Т. 15 - №11. - С.2039-2043.
19. Григолюк Э.И. Уравнения осесимметричных биметаллических упругих оболочек / Э.И. Григолюк // Инженерный сборник. – 1954. – Т. XVIII. - С. 89-98.
20. Meissner E. Das Elastizitätsproblem für dünne Schalen von Ringflächen, Kugel und Kegelform /E.Meissner // Physikalische Zeitschrift. 1913. - Bd. 14 - №8.
21. Бать М.И. Теоретическая механика в примерах и задачах. Т.3. Специальные главы механики / М.И. Бать, Г.Ю. Джанелидзе, А.С. Кельзон. - М.: Наука, 1973. – 488 с.
22. Рашевский П.К. Курс дифференциальной геометрии / П.К. Рашевский. - М.: Гостехиздат, 1950. – 360 с.
23. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложение в технике / В.З. Власов. М.-Л.: Гостехиздат, 1949. – 784 с.
2. Karman T. Über die Formänderung dünnwandiger Rohre, insbesondere Ansgleichrohre / T. Karman // VDI Zeitschrift. - 1911. - Vol. 55. - №45. - p. 1889-1895.
3. Clark R. Bending of curved tubes / R. Clark, E. Reissner // Advances in Applied Mechanics. – 1951. - Vol. 2. - 93 p.
4. Akselrad E.L. Gibkiye obolochki / E.L. Aksel'rad. - M.: Izd-vo «Nauka». Glav. Red. Fiz.-mat. lit-ry, 1976. - 376 p.
5. Akselrad E.L. Tonkostennyye krivolineynyye sterzhni i truby / E.L. Aksel'rad // Sb. «Issledovaniya po stroitel'noy mekhanike». Trudy LIIZHT. 1966. - Vyp. 249. - p. 147-168.
6. Akselrad E.L. Utochneniye verkhney kriticheskoy nagruzki izgiba truby s uchetom dokriticheskoy deformatsii / E.L. Aksel'rad // Izv. AN SSSR, MTT. – 1967. - №2.
7. Ilin V.P. Ob izgibe krivykh tonkostennykh trub / V.P. Il'in // Tr. Leningr. inzh. – stroit. in-ta. – 1966. – Vyp. 49. – p. 201-230.
8. Ilin V.P. K raschetu krivolineynykh bimetallicheskiykh trub / V.P. Il'in // Izv. AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela. – 1973. - № 5. - p. 152-159.
9. Vol'mir A.S. Ustoychivost' deformiruyemykh sistem / A.S. Vol'mir. - M.: Nauka, 1967. – 984 p.
10. Orynyak I.V. First approximation to elastic analysis of end-effects in pipe bends / I.V. Orynyak // Int. Journ. of Pressure Vessels and Piping. – 2002. - Vol.79. - №2. - p. 157-164.
11. Orynyak I.V. Resheniye dlya uprugogo giba truby na osnove gipotezy ploskikh secheniy / I.V. Orynyak // Vestnik NTU «KPI». Mashinostroyeniye – 2002. - Vyp.43. - p. 60-67.
12. Kostovetskiy D.L. Prochnost' truboprovodnykh sistem energeticheskikh ustanovok / D.L. Kostovetskiy. - L.: Izd-vo «Energiya», 1973. – 264 p.
13. Meckenzie D., Bell R.A. A simple pipe bend element for piping flexibility analysis / D. Meckenzie, R.A.Bell // Int. Journ. of Pressure Vessels and Piping. -1992. - Vol.51. - №1. - p.85-106.
14. Ohtsubo H., Watanabe O. Flexibility and stress factors of pipe bends - an analysis by finite ring method /H. Ohtsubo, O. Watanabe // Trans. ASME. – Journ. Pressure Vessel Tech. – 1977. - Vol.99. - p. 281-290.
15. Bathe K.J., Almeida C.A. A simple and effective pipe elbow element – linear analysis / K.J.Bathe, C.A. Almeida // Trans. ASME. J. Appl. Mech. – 1980. - Vol.47. p.93-100.
16. Pukhliy V.A. Ob odnoy krayevoy zadache dlya uprugogo giba truboprovodov AES / V.A. Pukhliy, L.O. Nagolyuk, L.V. Kutovoy, L.N. Pichugova, A.V. Chuklina, V.P. Galenina // Teoriya mekhanizmov i mashin (TMM). – 2014. – Т. 12 - №2(24). - p.1-14.
17. Pukhliy V.A. Metod analiticheskogo resheniya dvumernykh krayevykh zadach dlya sistem ellipticheskikh uravneniy / V.A. Pukhliy // Zhurnal

References

1. Akselrad E.L. Raschet truboprovodov / E.L. Aksel'rad, V.P. Il'in. - L.: Mashinostroyeniye, 1970. – 240 p.

- vychisl. matem. i matem. fiziki. - 1978. T. 18. - №5
- p. 1275-1282.
18. Pukhliy V.A. Ob odnom podkhode k resheniyu krayevykh zadach matematicheskoy fiziki / V.A. Pukhliy // *Differentsial'nyye uravneniya*. – 1979. T. 15 - №11. - p.2039-2043.
 19. Grigolyuk E.I. Uravneniya osesimmetrichnykh bimetallicheskikh uprugikh obolochek / E.I. Grigolyuk // *Inzhenernyy sbornik*. – 1954. – T. XVIII. - p. 89-98.
 20. Meissner E. Das Elastizitätsproblem für dünne Schalen von Ringflächen, Kugel und Kegelform /E.Meissner // *Physikalische Zeitschrift*. 1913. - Bd. 14 - №8.
 21. Bat' M.I. Teoreticheskaya mekhanika v primerakh i zadachakh. T.3. Spetsial'nyye glavy mekhaniki / M.I. Bat', G.YU. Dzhanlidze, A.S. Kel'zon. - M.: Nauka, 1973. – 488p.
 22. Rashevskiy P.K. Kurs differentsial'noy geometrii / P.K. Rashevskiy. - M.: Gostekhizdat, 1950. – 360 p.
 23. Vlasov V.Z. Obshchaya teoriya obolochek i yeye prilozheniye v tekhnike / V.Z. Vlasov. M.-L.: Gostekhizdat, 1949. – 784 p.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.5

Автоматическое управление беспилотным летательным аппаратом**Л.Н. Канов, В.Г. Лукашов***ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, e-mail: vsevsad.sev@mail.ru*

Статья поступила 19.09.2019 г.; после доработки 23.09.2019 г.

Аннотация

Разработано упрощенное математическое описание движения беспилотных летательных аппаратов в виде системы четырех уравнений в различных условиях движения. Обоснован выбор средств описания заданной траектории движения на плоскости в системе координат. Предложен способ управления, позволяющий удерживать беспилотный летательный аппарат на заданной траектории. Разработан способ поддержания скорости на желаемом уровне.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, управление, автоматизация, стабилизация скорости, заданная траектория.

Automatic control of unmanned aerial vehicle**L.N. Kanov, V.G. Lukashov***Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, e-mail: vsevsad.sev@mail.ru*

Received 19.09.2019 y.; received in final form 23.09.2019 y.

Abstract

There is worked out a simplified mathematical description of unmanned aerial vehicle motion as a system of four equations in different driving conditions. The choice of means is justified to describe a given motion path on a plane in a coordinate system. The way of control is suggested to keep the unmanned aerial vehicle on a predetermined path. A method of maintaining the desired speed is developed.

Keywords: unmanned aerial vehicle, control, automatic, speed stabilization, set trajectory

Введение

Развитие промышленности определяет потребности во внедрении автоматизированных систем во всех отраслях производства. Повышенный интерес к автоматизированным системам связан с их способностью работать в различных экстремальных условиях, нежелательных для человека. Поэтому объем задач для применения автоматизированных систем расширяется, нарастают требования к их возможностям. Для построения высокоэффективных систем управления нужно применять методы,

которые дают возможность функционировать в тяжелых условиях без участия человека.

В последнее время при проведении работ в среде, оказывающей нежелательное влияние на человека, часто применяются беспилотные автоматизированные транспортные средства. Они сочетают в себе возможность самостоятельного принятия решений при изменении параметров окружающей среды и быстрого изменения технических заданий.

К современным и перспективным типам летательных аппаратов предъявляются повышенные требования по таким динамическим

свойствам пространственного движения, как маневренность и управляемость. Область их применения предполагает полеты на режимах, близких к критическим, например, полет на сверхмалой высоте в условиях сложного рельефа местности. Проблема автоматического управления беспилотными летательными аппаратами (БЛА), способными автономно функционировать во взаимодействии с реальной воздушной средой, имеет несколько направлений. Одно из них связано с необходимостью организации самостоятельного движения по заданной траектории, ориентируясь на сигналы локальных или глобальных навигационных систем.

Другое направление предполагает движение с заданной скоростью на различных интервалах траектории. Далее нужно отслеживать противодействие среды: состояние атмосферы, ветер, противодействие противника, случайный характер загрузки. Здесь необходимо обрабатывать навигационную информацию, учитывать динамические свойства окружающей среды, формировать управляющие сигналы на силовые исполнительные органы для отработки заданного движения. В условиях неопределенного изменения окружающей атмосферы БЛА должен отслеживать эти изменения и корректировать траекторию своего движения.

В общем виде составной частью БЛА является аэродинамический корпус, относительно которого оценивается поведение БЛА. Корпус имеет массу m и моменты инерции относительно центра тяжести. Кроме того, на корпусе должны быть исполнительные двигатели, которые обеспечивают силы, направляющие движение БЛА в пространстве.

Увеличивающийся круг задач требует разработки систем автоматического управления, самостоятельно принимающих решения при изменении параметров среды и отвечающих требованиям оперативного изменения технологического задания. Используемые обычно методы при проектировании автопилотов основаны на упрощенных моделях БЛА. При этом часть динамических свойств объектов, которые должен быть использовать регулятор, терялась. Это приводит к недоверию к средствам автоматики, особенно в критических режимах движения. Решением этой проблемы является построение законов управления на основе полной математической модели БЛА, наиболее точно отражающей его динамику. Таким образом, выбранная тема проекта является актуальной и практически значимой. Создание БЛА, обладающих высокой маневренностью и элементами интеллект-

та, является приоритетным направлением развития современной техники.

Целью статьи является построение методов управления беспилотным летательным аппаратом, обеспечивающих реализацию требуемых режимов движения по оперативно задаваемой траектории с заданной скоростью, с учетом влияния окружающей воздушной среды и учитывающих все их нелинейные свойства по полной математической модели.

Для достижения этой цели поставлены и решены следующие задачи:

- построение математической модели летательного аппарата;
- выбор способа построения заданной траектории движения;
- определение управляющих воздействий для реализации движения по заданной дальности и высоте;
- определение управляющих воздействий для реализации движения по заданной скорости и высоте;
- управление движением строя летательных аппаратов.

Задание траектории двумя функциями времени

В общем случае для успешной аппроксимации сложной траектории требуется повышение степени полинома и увеличения количества коэффициентов аппроксимации. Альтернативным способом задания траектории является выбор ее в виде двух функций положения БЛА в ортогональных координатах от времени $\varphi_x(t)$, $\varphi_y(t)$. Эти функции задаются следующим образом. На плоскости x, y строится график желаемой траектории, на котором делаются отметки времени, за которое БЛА должен проходить траекторию: $t_0, t_1, t_2, \dots, t_f$ (рис. 1, а). Координаты этих точек обозначим $x_0, y_0; x_1, y_1; x_2, y_2; \dots, x_f, y_f$. На чертеже графика по времени $\varphi_x(t)$, $\varphi_y(t)$ (рис. 1, б) отметим заданные моменты времени и соответствующие значения координат $\varphi_0(t)$, $\varphi_1(t)$; $\varphi_2(t)$, $\varphi_3(t)$; $\varphi_4(t)$, $\varphi_5(t)$; $\varphi_6(t)$, $\varphi_7(t)$; $\varphi_8(t)$, $\varphi_9(t)$; $\varphi_{10}(t)$, $\varphi_{11}(t)$; $\varphi_{12}(t)$, $\varphi_{13}(t)$; $\varphi_{14}(t)$, $\varphi_{15}(t)$; $\varphi_{16}(t)$, $\varphi_{17}(t)$; $\varphi_{18}(t)$, $\varphi_{19}(t)$; $\varphi_{20}(t)$, $\varphi_{21}(t)$; $\varphi_{22}(t)$, $\varphi_{23}(t)$; $\varphi_{24}(t)$, $\varphi_{25}(t)$; $\varphi_{26}(t)$, $\varphi_{27}(t)$; $\varphi_{28}(t)$, $\varphi_{29}(t)$; $\varphi_{30}(t)$, $\varphi_{31}(t)$; $\varphi_{32}(t)$, $\varphi_{33}(t)$; $\varphi_{34}(t)$, $\varphi_{35}(t)$; $\varphi_{36}(t)$, $\varphi_{37}(t)$; $\varphi_{38}(t)$, $\varphi_{39}(t)$; $\varphi_{40}(t)$, $\varphi_{41}(t)$; $\varphi_{42}(t)$, $\varphi_{43}(t)$; $\varphi_{44}(t)$, $\varphi_{45}(t)$; $\varphi_{46}(t)$, $\varphi_{47}(t)$; $\varphi_{48}(t)$, $\varphi_{49}(t)$; $\varphi_{50}(t)$, $\varphi_{51}(t)$; $\varphi_{52}(t)$, $\varphi_{53}(t)$; $\varphi_{54}(t)$, $\varphi_{55}(t)$; $\varphi_{56}(t)$, $\varphi_{57}(t)$; $\varphi_{58}(t)$, $\varphi_{59}(t)$; $\varphi_{60}(t)$, $\varphi_{61}(t)$; $\varphi_{62}(t)$, $\varphi_{63}(t)$; $\varphi_{64}(t)$, $\varphi_{65}(t)$; $\varphi_{66}(t)$, $\varphi_{67}(t)$; $\varphi_{68}(t)$, $\varphi_{69}(t)$; $\varphi_{70}(t)$, $\varphi_{71}(t)$; $\varphi_{72}(t)$, $\varphi_{73}(t)$; $\varphi_{74}(t)$, $\varphi_{75}(t)$; $\varphi_{76}(t)$, $\varphi_{77}(t)$; $\varphi_{78}(t)$, $\varphi_{79}(t)$; $\varphi_{80}(t)$, $\varphi_{81}(t)$; $\varphi_{82}(t)$, $\varphi_{83}(t)$; $\varphi_{84}(t)$, $\varphi_{85}(t)$; $\varphi_{86}(t)$, $\varphi_{87}(t)$; $\varphi_{88}(t)$, $\varphi_{89}(t)$; $\varphi_{90}(t)$, $\varphi_{91}(t)$; $\varphi_{92}(t)$, $\varphi_{93}(t)$; $\varphi_{94}(t)$, $\varphi_{95}(t)$; $\varphi_{96}(t)$, $\varphi_{97}(t)$; $\varphi_{98}(t)$, $\varphi_{99}(t)$; $\varphi_{100}(t)$, $\varphi_{101}(t)$; $\varphi_{102}(t)$, $\varphi_{103}(t)$; $\varphi_{104}(t)$, $\varphi_{105}(t)$; $\varphi_{106}(t)$, $\varphi_{107}(t)$; $\varphi_{108}(t)$, $\varphi_{109}(t)$; $\varphi_{110}(t)$, $\varphi_{111}(t)$; $\varphi_{112}(t)$, $\varphi_{113}(t)$; $\varphi_{114}(t)$, $\varphi_{115}(t)$; $\varphi_{116}(t)$, $\varphi_{117}(t)$; $\varphi_{118}(t)$, $\varphi_{119}(t)$; $\varphi_{120}(t)$, $\varphi_{121}(t)$; $\varphi_{122}(t)$, $\varphi_{123}(t)$; $\varphi_{124}(t)$, $\varphi_{125}(t)$; $\varphi_{126}(t)$, $\varphi_{127}(t)$; $\varphi_{128}(t)$, $\varphi_{129}(t)$; $\varphi_{130}(t)$, $\varphi_{131}(t)$; $\varphi_{132}(t)$, $\varphi_{133}(t)$; $\varphi_{134}(t)$, $\varphi_{135}(t)$; $\varphi_{136}(t)$, $\varphi_{137}(t)$; $\varphi_{138}(t)$, $\varphi_{139}(t)$; $\varphi_{140}(t)$, $\varphi_{141}(t)$; $\varphi_{142}(t)$, $\varphi_{143}(t)$; $\varphi_{144}(t)$, $\varphi_{145}(t)$; $\varphi_{146}(t)$, $\varphi_{147}(t)$; $\varphi_{148}(t)$, $\varphi_{149}(t)$; $\varphi_{150}(t)$, $\varphi_{151}(t)$; $\varphi_{152}(t)$, $\varphi_{153}(t)$; $\varphi_{154}(t)$, $\varphi_{155}(t)$; $\varphi_{156}(t)$, $\varphi_{157}(t)$; $\varphi_{158}(t)$, $\varphi_{159}(t)$; $\varphi_{160}(t)$, $\varphi_{161}(t)$; $\varphi_{162}(t)$, $\varphi_{163}(t)$; $\varphi_{164}(t)$, $\varphi_{165}(t)$; $\varphi_{166}(t)$, $\varphi_{167}(t)$; $\varphi_{168}(t)$, $\varphi_{169}(t)$; $\varphi_{170}(t)$, $\varphi_{171}(t)$; $\varphi_{172}(t)$, $\varphi_{173}(t)$; $\varphi_{174}(t)$, $\varphi_{175}(t)$; $\varphi_{176}(t)$, $\varphi_{177}(t)$; $\varphi_{178}(t)$, $\varphi_{179}(t)$; $\varphi_{180}(t)$, $\varphi_{181}(t)$; $\varphi_{182}(t)$, $\varphi_{183}(t)$; $\varphi_{184}(t)$, $\varphi_{185}(t)$; $\varphi_{186}(t)$, $\varphi_{187}(t)$; $\varphi_{188}(t)$, $\varphi_{189}(t)$; $\varphi_{190}(t)$, $\varphi_{191}(t)$; $\varphi_{192}(t)$, $\varphi_{193}(t)$; $\varphi_{194}(t)$, $\varphi_{195}(t)$; $\varphi_{196}(t)$, $\varphi_{197}(t)$; $\varphi_{198}(t)$, $\varphi_{199}(t)$; $\varphi_{200}(t)$, $\varphi_{201}(t)$; $\varphi_{202}(t)$, $\varphi_{203}(t)$; $\varphi_{204}(t)$, $\varphi_{205}(t)$; $\varphi_{206}(t)$, $\varphi_{207}(t)$; $\varphi_{208}(t)$, $\varphi_{209}(t)$; $\varphi_{210}(t)$, $\varphi_{211}(t)$; $\varphi_{212}(t)$, $\varphi_{213}(t)$; $\varphi_{214}(t)$, $\varphi_{215}(t)$; $\varphi_{216}(t)$, $\varphi_{217}(t)$; $\varphi_{218}(t)$, $\varphi_{219}(t)$; $\varphi_{220}(t)$, $\varphi_{221}(t)$; $\varphi_{222}(t)$, $\varphi_{223}(t)$; $\varphi_{224}(t)$, $\varphi_{225}(t)$; $\varphi_{226}(t)$, $\varphi_{227}(t)$; $\varphi_{228}(t)$, $\varphi_{229}(t)$; $\varphi_{230}(t)$, $\varphi_{231}(t)$; $\varphi_{232}(t)$, $\varphi_{233}(t)$; $\varphi_{234}(t)$, $\varphi_{235}(t)$; $\varphi_{236}(t)$, $\varphi_{237}(t)$; $\varphi_{238}(t)$, $\varphi_{239}(t)$; $\varphi_{240}(t)$, $\varphi_{241}(t)$; $\varphi_{242}(t)$, $\varphi_{243}(t)$; $\varphi_{244}(t)$, $\varphi_{245}(t)$; $\varphi_{246}(t)$, $\varphi_{247}(t)$; $\varphi_{248}(t)$, $\varphi_{249}(t)$; $\varphi_{250}(t)$, $\varphi_{251}(t)$; $\varphi_{252}(t)$, $\varphi_{253}(t)$; $\varphi_{254}(t)$, $\varphi_{255}(t)$; $\varphi_{256}(t)$, $\varphi_{257}(t)$; $\varphi_{258}(t)$, $\varphi_{259}(t)$; $\varphi_{260}(t)$, $\varphi_{261}(t)$; $\varphi_{262}(t)$, $\varphi_{263}(t)$; $\varphi_{264}(t)$, $\varphi_{265}(t)$; $\varphi_{266}(t)$, $\varphi_{267}(t)$; $\varphi_{268}(t)$, $\varphi_{269}(t)$; $\varphi_{270}(t)$, $\varphi_{271}(t)$; $\varphi_{272}(t)$, $\varphi_{273}(t)$; $\varphi_{274}(t)$, $\varphi_{275}(t)$; $\varphi_{276}(t)$, $\varphi_{277}(t)$; $\varphi_{278}(t)$, $\varphi_{279}(t)$; $\varphi_{280}(t)$, $\varphi_{281}(t)$; $\varphi_{282}(t)$, $\varphi_{283}(t)$; $\varphi_{284}(t)$, $\varphi_{285}(t)$; $\varphi_{286}(t)$, $\varphi_{287}(t)$; $\varphi_{288}(t)$, $\varphi_{289}(t)$; $\varphi_{290}(t)$, $\varphi_{291}(t)$; $\varphi_{292}(t)$, $\varphi_{293}(t)$; $\varphi_{294}(t)$, $\varphi_{295}(t)$; $\varphi_{296}(t)$, $\varphi_{297}(t)$; $\varphi_{298}(t)$, $\varphi_{299}(t)$; $\varphi_{300}(t)$, $\varphi_{301}(t)$; $\varphi_{302}(t)$, $\varphi_{303}(t)$; $\varphi_{304}(t)$, $\varphi_{305}(t)$; $\varphi_{306}(t)$, $\varphi_{307}(t)$; $\varphi_{308}(t)$, $\varphi_{309}(t)$; $\varphi_{310}(t)$, $\varphi_{311}(t)$; $\varphi_{312}(t)$, $\varphi_{313}(t)$; $\varphi_{314}(t)$, $\varphi_{315}(t)$; $\varphi_{316}(t)$, $\varphi_{317}(t)$; $\varphi_{318}(t)$, $\varphi_{319}(t)$; $\varphi_{320}(t)$, $\varphi_{321}(t)$; $\varphi_{322}(t)$, $\varphi_{323}(t)$; $\varphi_{324}(t)$, $\varphi_{325}(t)$; $\varphi_{326}(t)$, $\varphi_{327}(t)$; $\varphi_{328}(t)$, $\varphi_{329}(t)$; $\varphi_{330}(t)$, $\varphi_{331}(t)$; $\varphi_{332}(t)$, $\varphi_{333}(t)$; $\varphi_{334}(t)$, $\varphi_{335}(t)$; $\varphi_{336}(t)$, $\varphi_{337}(t)$; $\varphi_{338}(t)$, $\varphi_{339}(t)$; $\varphi_{340}(t)$, $\varphi_{341}(t)$; $\varphi_{342}(t)$, $\varphi_{343}(t)$; $\varphi_{344}(t)$, $\varphi_{345}(t)$; $\varphi_{346}(t)$, $\varphi_{347}(t)$; $\varphi_{348}(t)$, $\varphi_{349}(t)$; $\varphi_{350}(t)$, $\varphi_{351}(t)$; $\varphi_{352}(t)$, $\varphi_{353}(t)$; $\varphi_{354}(t)$, $\varphi_{355}(t)$; $\varphi_{356}(t)$, $\varphi_{357}(t)$; $\varphi_{358}(t)$, $\varphi_{359}(t)$; $\varphi_{360}(t)$, $\varphi_{361}(t)$; $\varphi_{362}(t)$, $\varphi_{363}(t)$; $\varphi_{364}(t)$, $\varphi_{365}(t)$; $\varphi_{366}(t)$, $\varphi_{367}(t)$; $\varphi_{368}(t)$, $\varphi_{369}(t)$; $\varphi_{370}(t)$, $\varphi_{371}(t)$; $\varphi_{372}(t)$, $\varphi_{373}(t)$; $\varphi_{374}(t)$, $\varphi_{375}(t)$; $\varphi_{376}(t)$, $\varphi_{377}(t)$; $\varphi_{378}(t)$, $\varphi_{379}(t)$; $\varphi_{380}(t)$, $\varphi_{381}(t)$; $\varphi_{382}(t)$, $\varphi_{383}(t)$; $\varphi_{384}(t)$, $\varphi_{385}(t)$; $\varphi_{386}(t)$, $\varphi_{387}(t)$; $\varphi_{388}(t)$, $\varphi_{389}(t)$; $\varphi_{390}(t)$, $\varphi_{391}(t)$; $\varphi_{392}(t)$, $\varphi_{393}(t)$; $\varphi_{394}(t)$, $\varphi_{395}(t)$; $\varphi_{396}(t)$, $\varphi_{397}(t)$; $\varphi_{398}(t)$, $\varphi_{399}(t)$; $\varphi_{400}(t)$, $\varphi_{401}(t)$; $\varphi_{402}(t)$, $\varphi_{403}(t)$; $\varphi_{404}(t)$, $\varphi_{405}(t)$; $\varphi_{406}(t)$, $\varphi_{407}(t)$; $\varphi_{408}(t)$, $\varphi_{409}(t)$; $\varphi_{410}(t)$, $\varphi_{411}(t)$; $\varphi_{412}(t)$, $\varphi_{413}(t)$; $\varphi_{414}(t)$, $\varphi_{415}(t)$; $\varphi_{416}(t)$, $\varphi_{417}(t)$; $\varphi_{418}(t)$, $\varphi_{419}(t)$; $\varphi_{420}(t)$, $\varphi_{421}(t)$; $\varphi_{422}(t)$, $\varphi_{423}(t)$; $\varphi_{424}(t)$, $\varphi_{425}(t)$; $\varphi_{426}(t)$, $\varphi_{427}(t)$; $\varphi_{428}(t)$, $\varphi_{429}(t)$; $\varphi_{430}(t)$, $\varphi_{431}(t)$; $\varphi_{432}(t)$, $\varphi_{433}(t)$; $\varphi_{434}(t)$, $\varphi_{435}(t)$; $\varphi_{436}(t)$, $\varphi_{437}(t)$; $\varphi_{438}(t)$, $\varphi_{439}(t)$; $\varphi_{440}(t)$, $\varphi_{441}(t)$; $\varphi_{442}(t)$, $\varphi_{443}(t)$; $\varphi_{444}(t)$, $\varphi_{445}(t)$; $\varphi_{446}(t)$, $\varphi_{447}(t)$; $\varphi_{448}(t)$, $\varphi_{449}(t)$; $\varphi_{450}(t)$, $\varphi_{451}(t)$; $\varphi_{452}(t)$, $\varphi_{453}(t)$; $\varphi_{454}(t)$, $\varphi_{455}(t)$; $\varphi_{456}(t)$, $\varphi_{457}(t)$; $\varphi_{458}(t)$, $\varphi_{459}(t)$; $\varphi_{460}(t)$, $\varphi_{461}(t)$; $\varphi_{462}(t)$, $\varphi_{463}(t)$; $\varphi_{464}(t)$, $\varphi_{465}(t)$; $\varphi_{466}(t)$, $\varphi_{467}(t)$; $\varphi_{468}(t)$, $\varphi_{469}(t)$; $\varphi_{470}(t)$, $\varphi_{471}(t)$; $\varphi_{472}(t)$, $\varphi_{473}(t)$; $\varphi_{474}(t)$, $\varphi_{475}(t)$; $\varphi_{476}(t)$, $\varphi_{477}(t)$; $\varphi_{478}(t)$, $\varphi_{479}(t)$; $\varphi_{480}(t)$, $\varphi_{481}(t)$; $\varphi_{482}(t)$, $\varphi_{483}(t)$; $\varphi_{484}(t)$, $\varphi_{485}(t)$; $\varphi_{486}(t)$, $\varphi_{487}(t)$; $\varphi_{488}(t)$, $\varphi_{489}(t)$; $\varphi_{490}(t)$, $\varphi_{491}(t)$; $\varphi_{492}(t)$, $\varphi_{493}(t)$; $\varphi_{494}(t)$, $\varphi_{495}(t)$; $\varphi_{496}(t)$, $\varphi_{497}(t)$; $\varphi_{498}(t)$, $\varphi_{499}(t)$; $\varphi_{500}(t)$, $\varphi_{501}(t)$; $\varphi_{502}(t)$, $\varphi_{503}(t)$; $\varphi_{504}(t)$, $\varphi_{505}(t)$; $\varphi_{506}(t)$, $\varphi_{507}(t)$; $\varphi_{508}(t)$, $\varphi_{509}(t)$; $\varphi_{510}(t)$, $\varphi_{511}(t)$; $\varphi_{512}(t)$, $\varphi_{513}(t)$; $\varphi_{514}(t)$, $\varphi_{515}(t)$; $\varphi_{516}(t)$, $\varphi_{517}(t)$; $\varphi_{518}(t)$, $\varphi_{519}(t)$; $\varphi_{520}(t)$, $\varphi_{521}(t)$; $\varphi_{522}(t)$, $\varphi_{523}(t)$; $\varphi_{524}(t)$, $\varphi_{525}(t)$; $\varphi_{526}(t)$, $\varphi_{527}(t)$; $\varphi_{528}(t)$, $\varphi_{529}(t)$; $\varphi_{530}(t)$, $\varphi_{531}(t)$; $\varphi_{532}(t)$, $\varphi_{533}(t)$; $\varphi_{534}(t)$, $\varphi_{535}(t)$; $\varphi_{536}(t)$, $\varphi_{537}(t)$; $\varphi_{538}(t)$, $\varphi_{539}(t)$; $\varphi_{540}(t)$, $\varphi_{541}(t)$; $\varphi_{542}(t)$, $\varphi_{543}(t)$; $\varphi_{544}(t)$, $\varphi_{545}(t)$; $\varphi_{546}(t)$, $\varphi_{547}(t)$; $\varphi_{548}(t)$, $\varphi_{549}(t)$; $\varphi_{550}(t)$, $\varphi_{551}(t)$; $\varphi_{552}(t)$, $\varphi_{553}(t)$; $\varphi_{554}(t)$, $\varphi_{555}(t)$; $\varphi_{556}(t)$, $\varphi_{557}(t)$; $\varphi_{558}(t)$, $\varphi_{559}(t)$; $\varphi_{560}(t)$, $\varphi_{561}(t)$; $\varphi_{562}(t)$, $\varphi_{563}(t)$; $\varphi_{564}(t)$, $\varphi_{565}(t)$; $\varphi_{566}(t)$, $\varphi_{567}(t)$; $\varphi_{568}(t)$, $\varphi_{569}(t)$; $\varphi_{570}(t)$, $\varphi_{571}(t)$; $\varphi_{572}(t)$, $\varphi_{573}(t)$; $\varphi_{574}(t)$, $\varphi_{575}(t)$; $\varphi_{576}(t)$, $\varphi_{577}(t)$; $\varphi_{578}(t)$, $\varphi_{579}(t)$; $\varphi_{580}(t)$, $\varphi_{581}(t)$; $\varphi_{582}(t)$, $\varphi_{583}(t)$; $\varphi_{584}(t)$, $\varphi_{585}(t)$; $\varphi_{586}(t)$, $\varphi_{587}(t)$; $\varphi_{588}(t)$, $\varphi_{589}(t)$; $\varphi_{590}(t)$, $\varphi_{591}(t)$; $\varphi_{592}(t)$, $\varphi_{593}(t)$; $\varphi_{594}(t)$, $\varphi_{595}(t)$; $\varphi_{596}(t)$, $\varphi_{597}(t)$; $\varphi_{598}(t)$, $\varphi_{599}(t)$; $\varphi_{600}(t)$, $\varphi_{601}(t)$; $\varphi_{602}(t)$, $\varphi_{603}(t)$; $\varphi_{604}(t)$, $\varphi_{605}(t)$; $\varphi_{606}(t)$, $\varphi_{607}(t)$; $\varphi_{608}(t)$, $\varphi_{609}(t)$; $\varphi_{610}(t)$, $\varphi_{611}(t)$; $\varphi_{612}(t)$, $\varphi_{613}(t)$; $\varphi_{614}(t)$, $\varphi_{615}(t)$; $\varphi_{616}(t)$, $\varphi_{617}(t)$; $\varphi_{618}(t)$, $\varphi_{619}(t)$; $\varphi_{620}(t)$, $\varphi_{621}(t)$; $\varphi_{622}(t)$, $\varphi_{623}(t)$; $\varphi_{624}(t)$, $\varphi_{625}(t)$; $\varphi_{626}(t)$, $\varphi_{627}(t)$; $\varphi_{628}(t)$, $\varphi_{629}(t)$; $\varphi_{630}(t)$, $\varphi_{631}(t)$; $\varphi_{632}(t)$, $\varphi_{633}(t)$; $\varphi_{634}(t)$, $\varphi_{635}(t)$; $\varphi_{636}(t)$, $\varphi_{637}(t)$; $\varphi_{638}(t)$, $\varphi_{639}(t)$; $\varphi_{640}(t)$, $\varphi_{641}(t)$; $\varphi_{642}(t)$, $\varphi_{643}(t)$; $\varphi_{644}(t)$, $\varphi_{645}(t)$; $\varphi_{646}(t)$, $\varphi_{647}(t)$; $\varphi_{648}(t)$, $\varphi_{649}(t)$; $\varphi_{650}(t)$, $\varphi_{651}(t)$; $\varphi_{652}(t)$, $\varphi_{653}(t)$; $\varphi_{654}(t)$, $\varphi_{655}(t)$; $\varphi_{656}(t)$, $\varphi_{657}(t)$; $\varphi_{658}(t)$, $\varphi_{659}(t)$; $\varphi_{660}(t)$, $\varphi_{661}(t)$; $\varphi_{662}(t)$, $\varphi_{663}(t)$; $\varphi_{664}(t)$, $\varphi_{665}(t)$; $\varphi_{666}(t)$, $\varphi_{667}(t)$; $\varphi_{668}(t)$, $\varphi_{669}(t)$; $\varphi_{670}(t)$, $\varphi_{671}(t)$; $\varphi_{672}(t)$, $\varphi_{673}(t)$; $\varphi_{674}(t)$, $\varphi_{675}(t)$; $\varphi_{676}(t)$, $\varphi_{677}(t)$; $\varphi_{678}(t)$, $\varphi_{679}(t)$; $\varphi_{680}(t)$, $\varphi_{681}(t)$; $\varphi_{682}(t)$, $\varphi_{683}(t)$; $\varphi_{684}(t)$, $\varphi_{685}(t)$; $\varphi_{686}(t)$, $\varphi_{687}(t)$; $\varphi_{688}(t)$, $\varphi_{689}(t)$; $\varphi_{690}(t)$, $\varphi_{691}(t)$; $\varphi_{692}(t)$, $\varphi_{693}(t)$; $\varphi_{694}(t)$, $\varphi_{695}(t)$; $\varphi_{696}(t)$, $\varphi_{697}(t)$; $\varphi_{698}(t)$, $\varphi_{699}(t)$; $\varphi_{700}(t)$, $\varphi_{701}(t)$; $\varphi_{702}(t)$, $\varphi_{703}(t)$; $\varphi_{704}(t)$, $\varphi_{705}(t)$; $\varphi_{706}(t)$, $\varphi_{707}(t)$; $\varphi_{708}(t)$, $\varphi_{709}(t)$; $\varphi_{710}(t)$, $\varphi_{711}(t)$; $\varphi_{712}(t)$, $\varphi_{713}(t)$; $\varphi_{714}(t)$, $\varphi_{715}(t)$; $\varphi_{716}(t)$, $\varphi_{717}(t)$; $\varphi_{718}(t)$, $\varphi_{719}(t)$; $\varphi_{720}(t)$, $\varphi_{721}(t)$; $\varphi_{722}(t)$, $\varphi_{723}(t)$; $\varphi_{724}(t)$, $\varphi_{725}(t)$; $\varphi_{726}(t)$, $\varphi_{727}(t)$; $\varphi_{728}(t)$, $\varphi_{729}(t)$; $\varphi_{730}(t)$, $\varphi_{731}(t)$; $\varphi_{732}(t)$, $\varphi_{733}(t)$; $\varphi_{734}(t)$, $\varphi_{735}(t)$; $\varphi_{736}(t)$, $\varphi_{737}(t)$; $\varphi_{738}(t)$, $\varphi_{739}(t)$; $\varphi_{740}(t)$, $\varphi_{741}(t)$; $\varphi_{742}(t)$, $\varphi_{743}(t)$; $\varphi_{744}(t)$, $\varphi_{745}(t)$; $\varphi_{746}(t)$, $\varphi_{747}(t)$; $\varphi_{748}(t)$, $\varphi_{749}(t)$; $\varphi_{750}(t)$, $\varphi_{751}(t)$; $\varphi_{752}(t)$, $\varphi_{753}(t)$; $\varphi_{754}(t)$, $\varphi_{755}(t)$; $\varphi_{756}(t)$, $\varphi_{757}(t)$; $\varphi_{758}(t)$, $\varphi_{759}(t)$; $\varphi_{760}(t)$, $\varphi_{761}(t)$; $\varphi_{762}(t)$, $\varphi_{763}(t)$; $\varphi_{764}(t)$, $\varphi_{765}(t)$; $\varphi_{766}(t)$, $\varphi_{767}(t)$; $\varphi_{768}(t)$, $\varphi_{769}(t)$; $\varphi_{770}(t)$, $\varphi_{771}(t)$; $\varphi_{772}(t)$, $\varphi_{773}(t)$; $\varphi_{774}(t)$, $\varphi_{775}(t)$; $\varphi_{776}(t)$, $\varphi_{777}(t)$; $\varphi_{778}(t)$, $\varphi_{779}(t)$; $\varphi_{780}(t)$, $\varphi_{781}(t)$; $\varphi_{782}(t)$, $\varphi_{783}(t)$; $\varphi_{784}(t)$, $\varphi_{785}(t)$; $\varphi_{786}(t)$, $\varphi_{787}(t)$; $\varphi_{788}(t)$, $\varphi_{789}(t)$; $\varphi_{790}(t)$, $\varphi_{791}(t)$; $\varphi_{792}(t)$, $\varphi_{793}(t)$; $\varphi_{794}(t)$, $\varphi_{795}(t)$; $\varphi_{796}(t)</$

Две полученные кривые отражают не только расположение траектории, но и скорость ее прохождения.

Два графика $\varphi_x(t)$, $\varphi_y(t)$ следует аппроксимировать полиномами третьего – пятого порядка по характерным точкам X_0Y_0 ; X_1Y_1 ; X_2Y_2 ; ... X_fY_f . В результате получаем две функции:

$$\varphi_x(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5;$$

$$\varphi_y(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5.$$

Даже при сложном виде желаемой траектории эти полиномы являются однозначными функциями и легче поддаются аппроксимации.

Математическое описание движения летательного аппарата

Движение летательного аппарата описывается уравнениями механики: уравнениями движения центра масс, уравнениями вращения вокруг центра масс [3, 4]. В полете на летательный аппарат действует сила тяжести mg , сила тяги двигателей P , подъемная сила L , сила сопротивления D , здесь m – масса летательного аппарата, g – ускорение свободного падения. Скорость летательного аппарата обозначим V . Вектор скорости не совпадает с продольной осью летательного аппарата, между ними находится угол атаки α (рис. 2). На рисунке обозначены: θ – угол наклона вектора скорости, касательного к траектории, к горизонту; ζ – угол наклона продольной оси летательного аппарата к горизонту (угол тангажа).

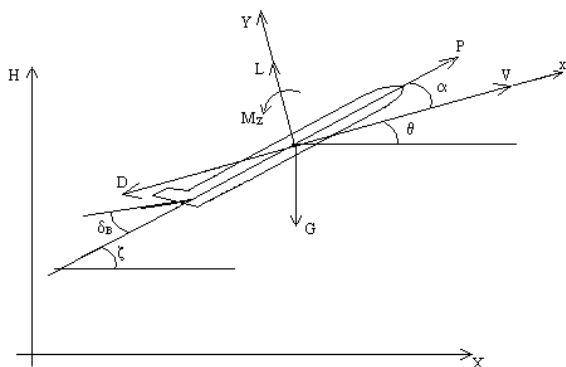


Рис. 2. Аэродинамическая схема беспилотного летательного аппарата

Момент инерции вращательного движения летательного аппарата вокруг центра тяжести с угловой скоростью Ω обозначим J_z , буквой x – горизонтальную координату перемещения самолета относительно земли; H – высота полета. Из рис. 2 следует, что горизонтальная проекция скорости составляет $V \cos \varphi$, вертикальная со-

ставляющая $V \sin \varphi$. По определению скорости получаем два первых уравнения математической модели летательного аппарата:

$$\frac{dX}{dt} = V \cos \theta; \quad \frac{dH}{dt} = V \sin \theta \quad (1)$$

Далее применяем второй закон Ньютона $ma = F$ вдоль вектора скорости и по оси, перпендикулярной скорости:

$$m \frac{dV}{dt} = P \cos \alpha - D - mg \sin \theta; \quad (2)$$

$$mV \frac{d\theta}{dt} = P \sin \alpha + L - mg \cos \theta.$$

Второй закон Ньютона для вращательного движения получаем в виде совокупности двух уравнений:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \Omega; \quad \frac{d\Omega}{dt} = M_z \quad (3)$$

В этих формулах M_z – вращающий момент, возникающий под действием руля высоты δ_B и зависящий от скорости и угла атаки. Формулы (1) – (3) представляют уравнения движения летательного аппарата в вертикальной плоскости.

Управление дальностью и высотой полета

Определим силу тяги P и вращающий момент M_z (а через него и угол руля высоты δ_B) для полета с заданной скоростью V_0 и на заданной высоте H_0 . Рассмотрим вначале полет по заданной траектории. Пусть имеется график зависимости высоты полета от времени и дальности полета от времени: $H_0(t)$ и $X_0(t)$. Отклонения реальной траектории полета от заданной обозначим $\Delta H(t) = H(t) - H_0(t)$ и $\Delta X(t) = X(t) - X_0(t)$, где $H(t)$, $X(t)$ – реальные траектории, получаемые решениями уравнений (1) – (3). Для успешного полета необходимо, чтобы эти отклонения стремились к нулю: $\Delta H(t) \rightarrow 0$, $\Delta X(t) \rightarrow 0$.

Подчиним отклонения траекторий устойчивым уравнениям второго порядка

$$T_2 \frac{d^2 \Delta X(t)}{dt^2} + T_1 \frac{d \Delta X(t)}{dt} + \Delta X(t) = 0; \quad (4)$$

$$T_4 \frac{d^2 \Delta H(t)}{dt^2} + T_3 \frac{d \Delta H(t)}{dt} + \Delta H(t) = 0$$

Вторые производные, входящие в (4), подсчитаем по правилам производной сложной функции. После раскрытия скобок и упрощения получаем два аналогичных выражения для силы тяги:

$$P = \frac{1}{\cos \theta} \left[D \cos \theta + L \sin \theta + m \left(\frac{d^2 X_0}{dt^2} - \frac{T_1}{T_2} \left(V \cos \theta - \frac{dX_0}{dt} \right) - \frac{X - X_0}{T_2} \right) \right] \quad (5)$$

$$P = \frac{1}{\sin \vartheta} \left[D \sin \theta - L \cos \theta + m \left(g + \frac{d^2 H_0}{dt^2} - \frac{T_4}{T_3} \left(V \sin \theta - \frac{dH_0}{dt} \right) - \frac{H - H_0}{T_3} \right) \right] \quad (6)$$

Подстановка силы тяги (5) или (6) в уравнения (2) обеспечивает отслеживание траектории по высоте или по расстоянию (рис.3).

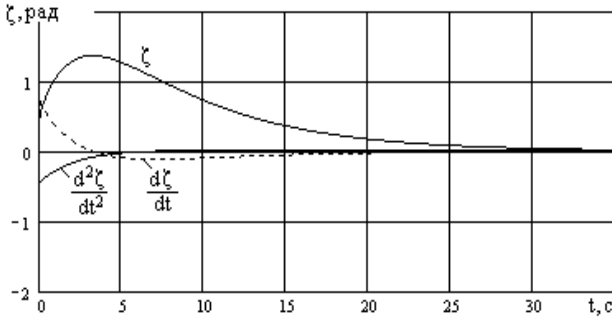


Рис.3. Заданный угол тангажа

Кроме этого, необходимо, чтобы во время полета угол тангажа принимал определенные значения: во время набора высоты $\zeta \approx 5...10^\circ$; во время горизонтального полета и посадки $\zeta \approx 0,5...2^\circ$ (рис. 2). Для обеспечения заданного угла тангажа получаем управляющий момент:

$$M_Z = J \left[\frac{d^2 \vartheta_0(t)}{dt^2} + \frac{T_5}{T_6} \left(\frac{d\vartheta_0(t)}{dt} - \Omega \right) + \frac{\vartheta_0 - \vartheta}{T_6} \right] \quad (7)$$

Таким образом, решая уравнения (1) – (3) с управлениями (7), получаем полет заданной дальности $X_0(t)$ с правильной ориентацией корпуса самолета $\vartheta_0(t)$ или полет на заданной высоте $H_0(t)$ с ориентацией $\vartheta_0(t)$ по уравнениям (1) – (3) с управлениями (7). Вычислительные эксперименты показали, что в первом случае не отслеживается высота полета, а во втором – не отслеживается дальность (рис. 4 и 5).

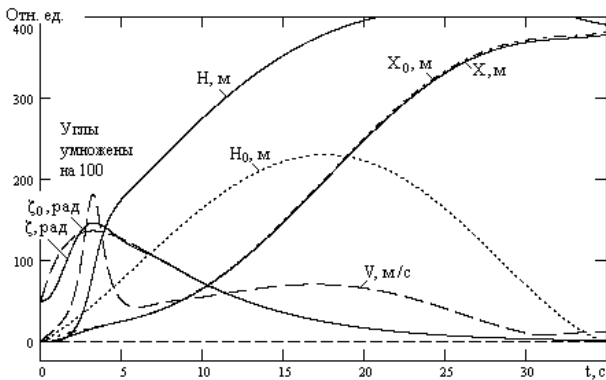


Рис. 4. Полет с заданной дальностью

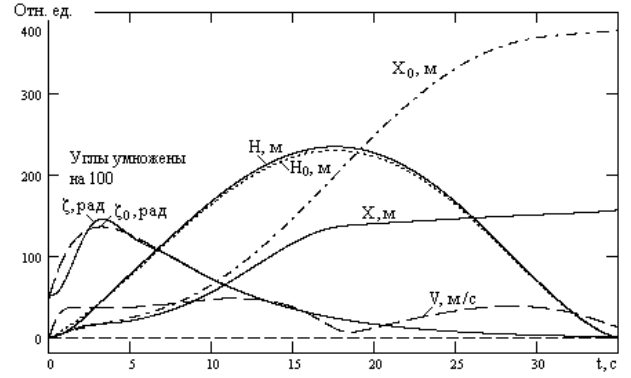


Рис. 5. Полет с заданной высотой

Поэтому актуальной задачей является стабилизация скорости полета по заданной величине.

Стабилизация заданного режима скорости

Определим силу тяги P и угол установки руля высоты δ_B самолета для обеспечения полета по траектории с заданной высотой $H_0(t)$ и с заданной скоростью $V_0(t)$. Предполагаем, что желаемая дальность $X_0(t)$ получается при полете со скоростью $V_0(t)$ за необходимое время. Вращающий момент M_Z , необходимый для поворота самолета вокруг оси, определяется углом установки руля высоты δ_B и зависит от скорости и угла атаки. Поэтому проще найти сначала не угол δ_B , а непосредственно момент M_Z . В свою очередь, вращающий момент однозначно определяет скорость поворота самолета по углу тангажа ζ в соответствии с уравнениями (10).

Поэтому сначала проще найти не сам момент, а угол тангажа ζ , а потом уже определять скорость Ω , момент и угол установки руля δ_B . Введем разности между желаемыми значениями скорости $V_0(t)$ и высоты $H_0(t)$ и их фактическими величинами V и H .

$$\Psi_V = V - V_0; \quad \Psi_H = H - H_0. \quad (8)$$

Необходимо, чтобы в результате управления эти разности стремились к нулю. Для этого подчиним разности Ψ_V и Ψ_H устойчивым уравнениям [5].

$$\frac{d\Psi_V}{dt} + T_V \Psi_V = 0; \quad \frac{d\Psi_H}{dt} + T_H \Psi_H = 0. \quad (9)$$

Подставляя производные из (8), (1), (2), получаем:

$$\frac{dV}{dt} - \frac{dV_0}{dt} + T_V \cdot (V - V_0) = 0;$$

$$\frac{dH}{dt} - \frac{dH_0}{dt} + T_H \cdot (H - H_0) = 0.$$

Подставляем производные скорости и высоты из основной системы уравнений (1), (2) и находим необходимую силу тяги:

$$\frac{P}{m} = \frac{\frac{D}{m} + g \sin \theta + \frac{dV_0}{dt} - T_V \cdot (V - V_0)}{\cos(\vartheta - \theta)}$$

(10)

Для получения угла тангажа аналогично получаем уравнение:

$$\left(\frac{dV_0(t)}{dt} - T_V \cdot (V - V_0(t)) \right) \sin(\theta) + \cos(\theta) \times$$

$$\times \left(\frac{D}{m} + g \sin \theta + \frac{dV_0(t)}{dt} - T_V \cdot (V - V_0(t)) \right) + \frac{L}{m} - g \cos \theta -$$

$$- \frac{d^2 H_0(t)}{dt^2} + T_1 V \sin(\theta) - T_1 \frac{dH_0(t)}{dt} + T_0 (H - H_0(t)) = 0.$$

(11)

Так как величины D и L являются известными функциями ϑ , то уравнение (11) полностью определяет необходимый угол тангажа ϑ для отслеживания скорости $V_0(t)$ и высоты $H_0(t)$. Трудность состоит в том, что из (11) невозможно получить явное выражение для ϑ .

Решение для угла тангажа

Для преодоления этого затруднения применим тот же прием, что и для определения силы тяги P . Обозначим левую часть (3.4) буквой Ψ , решение для ϑ должно удовлетворять условию $\Psi(\vartheta) = 0$. Подчиним Ψ устойчивому уравнению $\frac{d\Psi}{dt} + T_\varphi \Psi = 0$. Подсчитаем производную от Ψ по правилам производной от сложной функции и частные производные от аэродинамических коэффициентов.

Подставляя эти производные в уравнение $\frac{d\Psi}{dt} + T_\varphi \Psi = 0$, получаем уравнение для $\frac{d\vartheta}{dt}$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \vartheta} \right)^{-1} \left(- \frac{d\Psi}{dt} - \frac{\partial \Psi}{\partial H} \frac{dH}{dt} - \frac{\partial \Psi}{\partial V} \frac{dV}{dt} - \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} - T_\varphi \Psi \right)$$

Полученное выражение, по существу, есть четвертое уравнение в исходной системе уравнений движения БЛА, это скорость изменения угла тангажа Ω , необходимая для обеспечения заданной скорости и высоты полета.

На рис. 6 – 9 приведены результаты расчета режима полета по траектории, определяемыми выражениями $H_0(t) = h_1 t + h_2 t^2 + h_3 t^3 + h_4 t^4 + h_5 t^5 + h_6 t^6$

и $V_0 t = v_0 + v_1 t + v_2 t^2$ небольшого БЛА с типичными параметрами [5]: $m = 16,5$ кг; $J = 0,74$ кг/м²; $S = 1$ м²; $L = 2$ м; постоянные выбраны следующими: $T_0 = 0,3$; $T_1 = 0,9$; $T_V = 0,4$; $T_\varphi = 0,2$; начальные условия приняты $X(0) = 0$; $H(0) = 0$; $V(0) = 1$; $\theta(0) = 0,3$; $\vartheta(0) = 1$; коэффициенты аппроксимации: $h_1 = -1,668$; $h_2 = 2,072$; $h_3 = -0,147$; $h_4 = 4,168 \cdot 10^{-3}$; $h_5 = -5,41 \cdot 10^{-5}$; $h_6 = 2,671 \cdot 10^{-7}$; $v_0 = 1,25$; $v_1 = 6,255$; $v_2 = -0,104$.

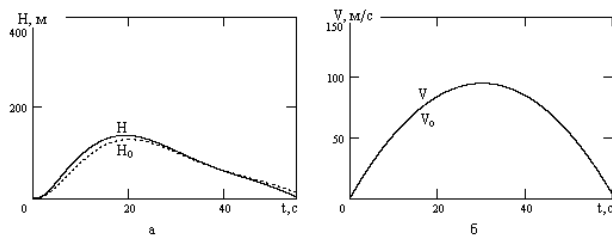


Рис. 6. Параметры полета: а) высота; б) скорость

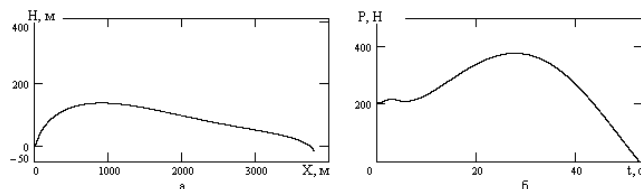


Рис. 7. Траектория полета а); сила тяги б)

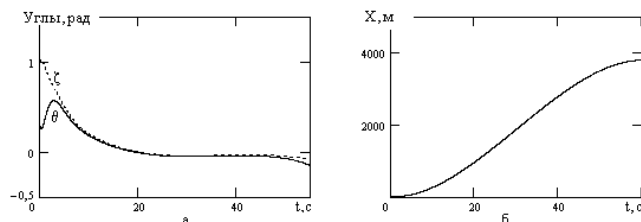


Рис. 8. Угол наклона траектории и угол тангажа а); дальность полета б)

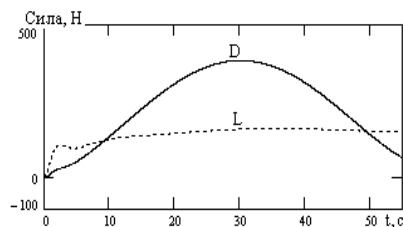


Рис. 9. Лобовое сопротивление и подъемная сила

Графики показывают, что желаемая траектория отслеживается с достаточной точностью. Графики желаемой и фактической скорости практически совпадают. На интервале набора высоты угол тангажа растет, далее снижается до

нуля. Сила тяги достигает максимума в середине интервала.

Сила сопротивления максимальна в середине интервала полета. Подъемная сила примерно постоянна. Аппарат пролетает около 4 км.

Графики момента и необходимого угла отклонения руля высоты изображены на рис.10. На интервале набора высоты момент испытывает колебания, а руль высоты отклоняется на максимальный угол.

По мере увеличения скорости угол руля уменьшается и удерживается на уровне 0,03 рад для обеспечения подъемной силы. При посадке угол уменьшается до нуля.

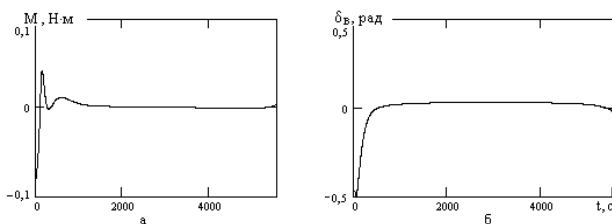


Рис. 10. Поворачивающий момент а); угол руля высоты б)

Результаты расчетов показали, что цели проекта при управлении продольным движением летательного аппарата достигаются.

В отличие от существующих подходов, в проекте выполнено построение регулятора продольного полета летательного аппарата на основе полной математической модели его движения без применения обычно применяемой линеаризации и представления системы управления по отдельным каналам управления.

Заключение

Таким образом, разработано упрощенное математическое описание движения беспилотных летательных аппаратов в виде системы четырех уравнений в различных условиях движения. Приведены основные понятия, известные примеры применения теории.

Обоснован выбор средств описания заданной траектории движения на плоскости в системе координат.

Показано, что применение метода наименьших квадратов позволяет с достаточной точностью определять коэффициенты аппроксимации траектории, заданной опорными точками.

Предложен способ управления, позволяющий удерживать беспилотный летательный аппарат на заданной траектории.

Способ основан на оценке отклонения траектории от заданного вида и соответствующей корректировке положения рулей.

Ввиду неустойчивой скорости движения разработан способ поддержания скорости на желаемом уровне за счет корректировки силы тяги двигателей.

Численные эксперименты показали, что предложенные способы обеспечивают приемлемое качество движения по заданной траектории.

Перспективным направлением дальнейшего исследования является построение системы управления реальными беспилотными летательными аппаратами на основе разработанных методов.

Список литературы

1. Дорф Р. Современные системы управления / Р.Дорф, Р.Бишоп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832с.
2. Теория автоматического управления / Л.С.Голдфарб и др. // Под ред. А.В.Нетушила. – М.: Высшая школа, 1967. – 424с.
3. Летов А.М. Динамика полета и управление. / А.М.Летов. – М.: Наука, 1969. – 342с.
4. Боднер В.А. Теория автоматического управления полетом. / В.А.Боднер – М.: Наука, 1964. – 700с.
5. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами. / А.А.Колесников – М.: КомКнига, 2006. – 240с.
6. Крутько П.Д. Задачи гашения энергии и алгоритмы управления движением динамических систем. Нелинейные модели / П.Д.Крутько // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1999. – № 6. – С.5 –24.
7. Вержбицкий В.М. Численные методы. / В.М.Вержбицкий – М.: Высшая школа, 2001. – 382с.

References

1. Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. *Sovremennyye sistemy upravleniya* [Modern Control Systems]. Moscow, Basic Knowledge Laboratory Publ., 2002, 832p.
2. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Automatic control theory] / L.S. Goldfarb // Ed. A.V. Netushila. Moscow, Vysshaya shkola, 1967, 424 p.
3. Letov A.M. *Dinamika poleta i upravleniye*. [Flight dynamics and control]. Moscow, Nauka, 1969, 342 p.

4. Bodner V.A. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya poletom*. [The theory of automatic flight control]. Moscow, Nauka, 1964, 700 p.
5. Kolesnikov A.A. *Sinergeticheskiye metody upravleniya slozhnymi sistemami* [Synergistic methods for managing complex systems] Moscow, KomKniga, 240 p.
6. Krutko P.D. *Zadachi gasheniya energii i algoritmy upravleniya dvizheniyem dinamicheskikh system. Nelineynyye modeli*. [Energy damping tasks and motion control algorithms for dynamic systems. Nonlinear models]. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya, 1999, No 6, pp. 5-24.
7. Verzhbitskiy V.M. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Vysshaya shkola, 2001, 382p.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.9:33

Использование биомассы для получения синтез-газаВ.М. Зайченко¹, В.В. Кувшинов², Е.Г. Какушина³*Объединённый институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН),
Москва, 125412, Россия, ¹zaitch@oivtran.ru**ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ²kuvshinov.vladimir@gmail.com, ³little@mail.ru*

Статья поступила 27.09.2019 г.; после доработки 30.09.2019 г.

Аннотация

Отходы сельскохозяйственной и деревообрабатывающей промышленности могут быть преобразованы в энергию, смягчая воздействие на окружающую среду. Представлены экспериментальные данные по составу и количеству газообразных продуктов, образующихся в процессе термической обработки различных видов сырья.

Ключевые слова: сельскохозяйственная и деревообрабатывающая промышленность, энергетика, воздействие на окружающую среду, газообразные продукты, процесс термической обработки различных видов сырья.

Synthesis gas production from various types of biomassV.M. Zaichenko¹, V.V. Kuvshinov², E.G. Kakyshina³*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (OIVT RAS),
Moscow, 125412, Russia, ¹zaitch@oivtran.ru**Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
²kuvshinov.vladimir@gmail.com, ³little@mail.ru*

Received 27.09.2019 y.; received in final form 30.09.2019 y.

Abstract

Agricultural and woodworking industry waste could be transformed into energy, mitigating environmental impact. The experimental data on composition and quantity of the gaseous products formed in the process of thermal treatment of various types of raw material are presented.

Keywords: Agricultural and woodworking industry, energy, environmental impact, gaseous products, process of thermal treatment of various types of raw material.

Введение

В современном мире одним из перспективных направлений развития энергетики является использование биомассы в качестве топлива. Применение местных энергетических ресурсов с экономической точки зрения более выгодно, чем использование привозных ископаемых видов топлива [1]. Целесообразным способом использования различных видов биомассы для энергетических целей является переработка исходного сырья в энергетический высококало-

рийный газ, а затем его использование в качестве топлива.

Сложившаяся ситуация заставляет искать решения внедрения новых технологий [2,3].

Существует несколько способов преобразования органического материала в топливный газ. Пиролиз является одним из эффективных методов термохимической переработки биомассы и позволяет получать твердое, жидкое и газообразное топливо практически из любого сырья, содержащего органические компоненты.

Процесс пиролиза заключается в нагревании углеводородного сырья в бескислородной среде и сопровождается деструкцией высокомолекулярных соединений с образованием неконденсируемых газов (H_2 , CO , C_nH_m , CO_2 , N_2) и летучих, представляющих собой парообразную смесь пирогенетической воды, смол и различных кислот [4]. Технология пиролиза позволяет получать газообразные, твердые и жидкие продукты. Увеличение степени конверсии сырья в газ может быть достигнуто благодаря высокотемпературной термической обработке жидкой фракции [3,4].

В литературных источниках описана технология термохимической переработки органического материала, заключающаяся в двухстадийной пиролизической конверсии биомассы в синтез-газ [6]. Преимущество этой технологии заключается в высокой степени конверсии обрабатываемого сырья и отсутствии жидкой фракции в получаемом газе. Технология включает две стадии переработки. Первая стадия основана на пиролизе биомассы, вторая заключается в высокотемпературном превращении парообразных продуктов пиролиза на поверхности пористого древесного угля в синтез-газ. Исследования проводились в соответствии с данной технологией.

Для получения синтез-газа из различных видов биомассы были отобраны образцы материалов двух видов: отходы целлюлозно-бумажного производства, а именно опил, кора и скоп, а также отходы сельскохозяйственного производства, такие как багасса и пергаментная оболочка кофейных зерен (далее шелуха). Эти виды отходов содержат органические вещества и при эффективной переработке могут служить источником для производства синтез-газа [6].

Проблема утилизации органических отходов очень важна с точки зрения охраны окружающей среды. Сельскохозяйственная, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность формируют значительное количество отходов, которые складываются, занимая большие площади и отрицательно воздействуя на окружающую среду.

Целлюлозно-бумажное производство, являясь отраслью лесной промышленности, включает в себя заготовку древесины, различные виды механической обработки и химической переработки.

Опил образуется как при лесопильных, так и при деревообрабатывающих процессах, в результате распиловки древесины на пильной установке. Объемы снимаемой с бревен коры

всегда значительны, поскольку окорка древесины – обязательный процесс её обработки перед дальнейшим использованием. Скоп образуется в цехе очистки промышленных стоков в результате обезвоживания осадка, образованного в процессе отстаивания сточных вод целлюлозно-бумажного комбината в первичных отстойниках.

Среди сельскохозяйственных отходов в качестве исследуемого сырья выделены тростниковая багасса и пергаментная шелуха кофе, поскольку они производятся в больших масштабах.

Производство кофейных зерен занимает важное место в мировой экономике, поскольку кофе является одним из самых распространенных продуктов питания, а также одним из главных экспортных товаров. Крупнейшими странами-производителями кофе являются Бразилия, Колумбия, Вьетнам.

При обработке кофейных зерен образуются значимые объёмы отходов. Собранные кофейные плоды очищаются от внешней мягкой оболочки с помощью сухой или влажной обработки. Оставшиеся пергаментные оболочки удаляются методом лущения. Образующаяся шелуха была отобрана в качестве материала для исследования.

Одной из важных задач является утилизация отходов, образующихся в сахарной промышленности.

Лидерами по производству сахарного тростника являются Бразилия, Индия и КНР. При выработке одной тонны сахара-сырца образуется свыше тонны побочного продукта – багассы. Багасса является целлюлозным материалом, волокнистой частью сахарного тростника, остающейся после его прессования и извлечения сока.

Описание характеристик исследуемого материала и лабораторной установки

В таблице 1 приведены характеристики исследуемых материалов в пересчете на сухое состояние: элементный состав, зольность и теплота сгорания.

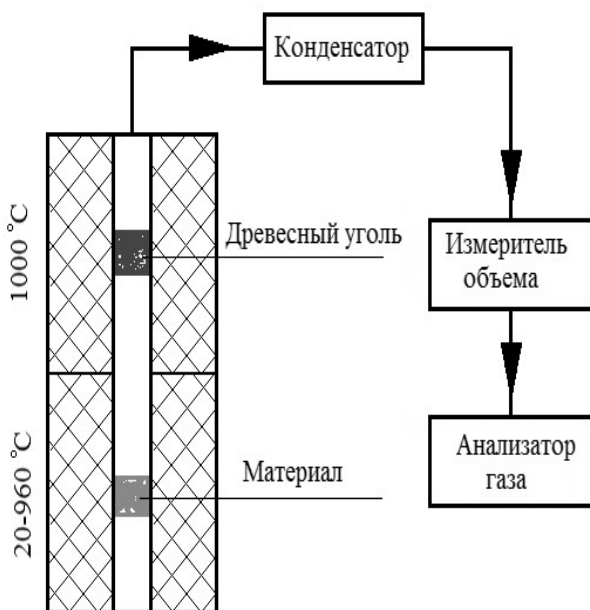
Элементный состав определялся с использованием элементного анализатора Vario Macro Cube. Влажность и зольность определялись с помощью термогравиметрического анализа (ТГА) с использованием термоанализатора SDT Q600.

Таблица 1. Характеристики исследуемых материалов

Материал	Элементный состав, %					Зольность, %	Теплота сгорания, МДж/кг	
	N	C	H	S	O		Q _Н	Q _В
Опил	0.09	51.14	6.14	0.87	41.22	0.54	19.26	20.66
Кора	0.04	72.18	9.94	0.00	17.35	0.49	32.81	35.06
Скоп	0.08	46.45	5.86	0.46	36.44	11.7	17.86	19.19
Шелуха	0.35	49.48	6.34	0.04	41.69	2.10	18.76	20.20
Багасса	0.46	43.55	5.25	0.09	48.79	1.86	14.86	16.04

Примечание: Q_Н – низшая теплота сгорания, МДж/кг, Q_В – высшая теплота сгорания, МДж/кг.

Экспериментальные данные получены на лабораторной установке, аналогичной описанной в работе [6]. На рис.1. изображена схема установки, которая включает реактор с двумя чашами, конденсатор, систему отвода и анализа газообразных продуктов, образующихся в результате двухстадийной пиролитической конверсии исходного сырья.

**Рис.1.** Схема экспериментальной установки

Реактор в виде стальной трубы с внутренним диаметром 37 мм и длиной 1000 мм помещался в двухсекционную печь, оборудованную двумя автономными нагревателями. Исходное сырье находилось в нижней части реактора. Биомасса была предварительно высушена при температуре 103 ± 2 °C. Влажность образцов

перед экспериментом составляла 1-2 %. Пористый древесный уголь помещался в верхнюю часть реактора. Перед экспериментом верхняя часть реактора нагревалась до температуры 1000°C, которая удерживалась далее на постоянном уровне. После этого нижнюю часть реактора нагревали до температуры 960°C. Темп нагрева составлял 7°C/мин.

Газообразные и парообразные продукты, образующиеся в процессе пиролиза, проходили через пористую углеродную среду с фиксированной температурой и поступали в конденсатор. В результате гомогенных и гетерогенных химических реакций в высокотемпературной зоне пиролизные газы разлагались. Объем неконденсируемых газов измерялся эвдиометрическим методом. Состав собранного газа определялся с помощью анализатора газа MRU Vario Plus Industrial. На основе экспериментальных данных был произведен расчет теплотворной способности газовой смеси.

Результаты экспериментальных исследований

В таблице 2 приведены характеристики газовой смеси, полученной путем двухстадийной пиролитической конверсии сырья, такие как процентное содержание горючих компонентов, удельный объемный выход газа и теплотворная способность.

Таблица2. Характеристики газовой смеси

Материал	Содержание горючих газов, %			Теплота сгорания, МДж/м³		Удельный объемный выход газа, м³/кг
	H ₂	CO	CH ₄	Q _Н	Q _В	
Опил	49.58	49.22	0.42	10.92	11.84	1.27
Кора	71.49	25.25	3.09	11.19	12.61	1.48
Скоп	52.63	46.46	0.40	10.90	11.87	1.23
Шелуха	48.47	50.25	0.25	10.87	11.77	1.29
Багасса	47.22	51.68	0.26	10.92	11.79	1.29

Примечание: Q_Н – низшая теплота сгорания, МДж/кг, Q_В – высшая теплота сгорания, МДж/кг.

Газовая смесь, полученная этим методом, состоит из водорода и монооксида углерода - 96-99%. Экспериментальные данные показыва-

ют влияние выбора сырья на состав и объём газовых смесей. Результаты измерений для опила совпадают с ранее проведенными аналогичными измерениями для древесных пеллет [5].

На рис.1 показана степень энергетической конверсии для исследуемых материалов, определенная как отношение высшей теплоты сгорания синтез-газа, полученного из 1 кг рабочей массы исходного сырья, к высшей теплоте сгорания рабочей массы исходного сырья.

Можно отметить, что степень энергетической конверсии варьируется в пределах от 0,5 до 1,0 в зависимости от вида исходного материала.

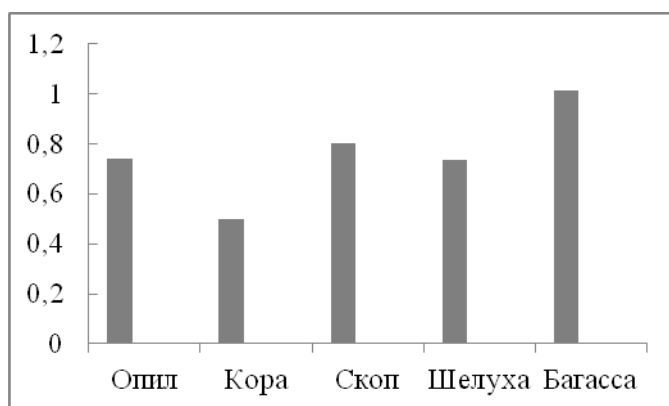


Рис.2. Степень энергетической конверсии при пиролизической переработке различных видов биомассы

Наибольший выход газа на один килограмм был получен в результате термохимической переработки коры. Синтез-газ состоит из водорода и монооксида углерода для испытуемых образцов, за исключением коры [4], в практически в равных частях. Для коры отношение объёмного содержания водорода и монооксида углерода является наибольшим из всех исследуемых образцов.

Выводы

Образование отходов - неотъемлемая характеристика лесного и сельскохозяйственного производства, а утилизация отходов является серьезной проблемой. Использование технологии двухэтапной пиролизической конверсии биомассы в газообразное топливо позволяет получать синтез-газ из отходов деревообрабатывающей, кофейной и сахарной промышленности. Удельный выход газа, его теплотворная способность, а также соотношение между объёмным содержанием водорода и монооксида углерода меняются в зависимости от вида ис-

ходного сырья. Такой метод может рассматриваться как перспективный метод утилизации такого вида отходов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 33 «Углеродная энергетика: химические аспекты».

Список литературы

1. Кувшинов В.В. Биогазовые технологии в сельском хозяйстве. Проблемы и перспективы развития в республике Крым / Жиганов И.Г., Смирнов В.В., Важеннин А.А., Хайбулаев // Э.Л.В сборнике: Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2018 сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. под ред. Л. И. Лукиной, Н. А. Бежина, Н. В. Ляминой. Севастополь, 2018. С. 637-642.
2. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В. // Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
3. Жиганов И.Г. Комбинированная солнечно-биоэнергетическая установка для сельского хозяйства республики Крым / Кувшинова В.В., Ненько А.А., Здарьев Д.С. // Энергетические установки и технологии. 2019. Т. 5. № 2. С. 94-98.
4. Батенин В.М. Пиролитическая конверсия биомассы в газообразное топливо / Член корреспондент РАН В.М. Батенин, В.М. Зайченко, В.Ф. Косов, В.А. Синельщиков // ДАН. - 2012. - том 446. - № 2. - С. 179 - 182.
5. Лавренов В.А. Двухстадийная пиролитическая конверсия различных видов биомассы в синтез-газ / В. А. Лавренов, О. М. Ларина, В. А. Синельщиков, Г. А. Сычев // ТВТ. - 2016. - № 6. - С. 950 - 956.
6. Косов В.В. Двухступенчатая технология преобразования биомассы в синтез-газ / В.В. Косов В.Ф. Ко-сов В.А. Синельщиков В.М. Зайченко // Энергетическая книга. Серия 1. «Материалы и процессы для энергетики: информирование о современных исследованиях и технологических разработках». - 2013. - С. 393-398.

References

1. Kuvshinov V.V. Biogas technologies in agriculture. Problems and development prospects in the Republic of Crimea / Zhiganov I.G., Smirnov V.V., Vazhenin A.A., Khaibulaev // E.L. in the collection: Ecological, industrial and energy safety - 2018 collection of articles on matter -lam of the international scientific and practical conference. un-

der the editorship of L. I. Lukina, N. A. Bezhina, N. V. Lyamina. Sevastopol, 2018. P. 637-642.

2. Guryev V.V. Development of renewable energy sources in the power system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol / Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. // Power plants and technologies - 2019.T. 5. No. 2. P. 90-93.
3. Zhiganov I.G. Combined solar-bio-energy installation for agriculture of the Republic of Crimea / Kuvshinova V.V., Nenko A.A., Zdaryev D.S. // Energy installations and technologies. 2019.T. 5. No. 2. P. 94-98.
4. Batenin V.M. Pyrolytic conversion of bio-mass to gaseous fuel / Corresponding Member of RAS V.M. Batenin, V.M. Zaichenko, V.F. Kosov, V.A. Sinelschikov // DAN. - 2012. - T 446. - No. 2. - P. 179 - 182.
5. Lavrenov V.A. Two-stage pyrolytic conversion of various types of biomass into synthesis gas / V. A. Lavrenov, O. M. Larina, V. A. Sinelschikov, G. A. Sychev // TVT. - 2016. - No. 6. - P. 950 - 956.
6. Kosov V.V. The two-stage technology of biomass conversion into synthesis gas / V.V. Kosov, V.F. Kosov, V.A. Sinelschikov, V.M. Zaichenko // Energy Book. Series 1. "Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments". - 2013. - P. 393-398.

УДК 620.9:33

Исследование процесса низкотемпературного пиролиза

В.М. Зайченко¹, О.М. Ларина², В.В. Кувшинов³, Е.Г. Какушина⁴*Объединённый институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН),
Москва, 125412, Россия, ¹zaitch@oivtran.ru, ²larina@oivtran.ru**ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ³kuvshinov.vladimir@gmail.com, ⁴littie@mail.ru*

Статья поступила 23.09.2019 г.; после доработки 25.09.2019 г.

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментального исследования влияния процесса обжига на свойства осадка сточных вод после анаэробного сбраживания. Температуры отжига составляют 220 и 300 °С. Приведены данные о составе, нижней теплотворной способности и пределе гигроскопичности как исходного сырья, так и осадка сточных вод.

Ключевые слова: представлены влияние процесса, анаэробное сбраживание, низшая теплотворная способность, предел гигроскопичности исходного сырья.

Effect of low-temperature pyrolysis on properties of sewage sludge after anaerobic digestion

V.M. Zaichenko¹, O.M. Larina², V.V. Kuvshinov³, E.G. Kakyshina⁴*Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (OIVT RAS),
Moscow, 125412, Russia, ¹zaitch@oivtran.ru, ²larina@oivtran.ru**Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
³kuvshinov.vladimir@gmail.com, ⁴littie@mail.ru*

Received 23.09.2019 y.; received in final form 25.09.2019 y.

Abstract

In this paper results of experimental research of the torrefaction process influence on the properties of the sewage sludge after anaerobic digestion are presented. The torrefaction temperatures are 220 and 300 °C. The data on composition, the lower calorific value and hygroscopicity limit of both initial raw material and torrefied sewage sludge are shown.

Keywords: process influence, anaerobic digestion are presented, the lower calorific value, hygroscopicity limit initial raw material.

Введение

Одной из актуальных экологических и технических проблем настоящего времени является утилизация и использование отходов жизнедеятельности человека [1,2,3,4], в частности осадка сточных вод (ОСВ). Осадок сточных вод – это основной вид отходов канализационных очистных сооружений, образующийся в результате механической и биохимической очистки кана-

лизационных стоков. В России по различным оценкам, ежегодно образуется до 2 млрд. кубических метров осадков с влажностью 96-97%, или порядка 80-100 млн. кубических метров по сухому веществу [5]. Уровень их использования оценивается в 1,0-1,5 % [5]. Большие объемы образующихся и накапливающихся ОСВ создают серьезную проблему для их утилизации. Складирование и хранение накапливающихся осадков приводит к постоянному загрязнению

подземных и поверхностных вод, а также почв прилегающих территорий [1]. Так же ОСВ является источником бактериального загрязнения, поскольку содержат патогенные микроорганизмы, а также возбудители желудочно-кишечных и других заболеваний, большое число яиц гельминтов [6].

Одним из первых процессов переработки биомассы, примененным в XX веке за рубежом и в нашей стране, является разложение осадка сточных вод и прочих органических отходов растительного и животного происхождения в анаэробной (без доступа кислорода) среде [1].

В последнее время анаэробное сбраживание используется в качестве способа переработки ввиду получения в результате этого процесса газообразного топлива – биогаза. Сбраживание осадков – это процесс перевода органического вещества ОСВ в стабилизированную форму. При этом незначительно уменьшается масса осадка вследствие частичного преобразования его в биогаз, а также снижаются его санитарная зараженность и выделение неприятных запахов при хранении [6,7,8,9]. Биогаз, образующийся при сбраживании ОСВ в основном состоит из метана – 65-70% и диоксида углерода – 25-30% [7]. Биогаз используют в качестве топлива в технологических котельных очистных сооружений, в двигателях генераторов электрической и тепловой энергии, для наполнения газовых баллонов автомобильного транспорта, тракторов и др.

Твердая фракция, которая остается после сбраживания представляет интерес для исследования, так как содержит в составе большое количество углерода, в пересчете на сухое вещество 35,4 – 87,8% [8].

Следовательно, предположительно может являться твердым топливом [7-10]. В данной работе рассмотрено влияние процесса низкотемпературного пиролиза (торрефикации) на основные топливные характеристики – низшую теплоту сгорания и предел гигроскопичности. Торрефикация – это процесс подогрева исходного сырья до температуры 220-300°C в бескислородной среде. При нагреве биомассы происходит ее термическое разложение, в результате которого образуются летучие продукты и твердый остаток.

Описание лабораторного стенда и методика проведения эксперимента

Лабораторный стенд для исследования процесса торрефикации ОСВ, состоящий из ла-

бораторной установки и контрольно-измерительного оборудования, представлен на рис. 1. Лабораторная установка включает в себя реактор пиролиза (1), газоход (2), конденсатор (3) и лабораторный холодильник (4).

В реактор пиролиза помещается высушенный до влажности 1% ОСВ после анаэробного сбраживания массой 80 грамм. В исходном виде ОСВ находится при влажности 70%.

Для проведения экспериментов производится термическая сушка осадка в сушильном шкафу при температуре 106°C в течении 48 часов. Стенд проверяется на герметичность и продувается аргоном для создания бескислородной среды. Включается нагреватель Н2 и, когда температура внутри газохода Т4 достигает 150°C, включается нагреватель Н1, начинается нагрев сырья до температуры торрефикации. Для исследования были выбраны две крайние температуры торрефикации: 220°C и 300°C.

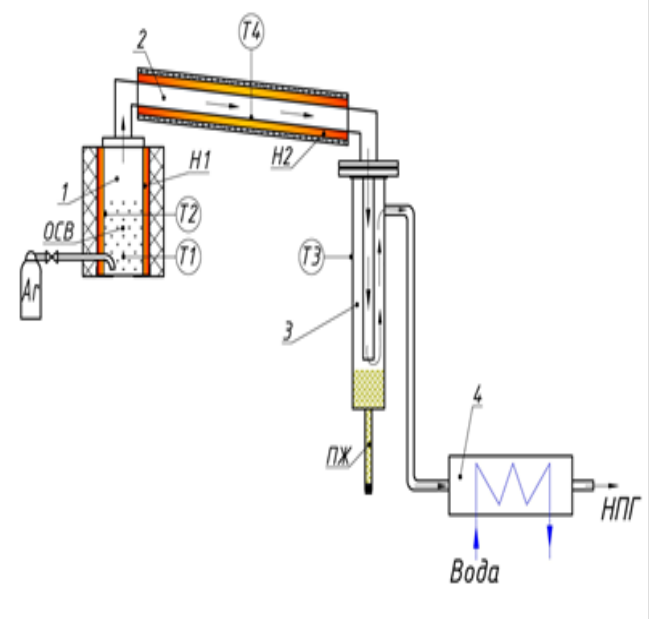


Рис.1. Схема лабораторного стенда для исследования процесса пиролиза:

- 1 - реактор пиролиза; 2 – газоход; 3 – конденсатор; 4 – лабораторный холодильник;
- Аг – баллон с аргоном; Н1 и Н2 – нагреватели; ПЖ – пиролизная жидкость;
- НПГ – неконденсируемые пиролизные газы; Т1, Т2, Т3 и Т4 – термометры.

По достижении температуры торрефикации производится выдержка в таких условиях в течение 20 минут.

Продуктами процесса торрефикации являются: твердый остаток, пиролизная жидкость и неконденсируемые пиролизные газы. Изменение температур внутри сырья и газохода в зави-

симости от времени проведения эксперимента представлено на рис. 2. Температура конденсатора Т3 на протяжении экспериментов постоянна и была равна $20 \pm 4^\circ\text{C}$.

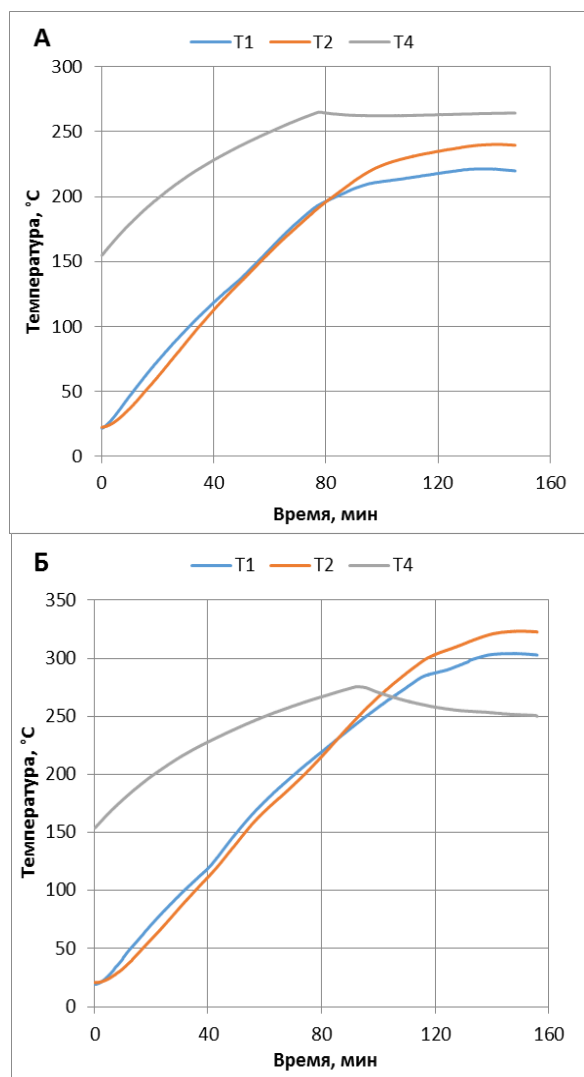


Рис.2. Зависимость температур в слое сырья и газозахода от времени:

А – при $T_t = 220^\circ\text{C}$, Б – при $T_t = 300^\circ\text{C}$.

Методика определения основных характеристик исходного сырья и твердого остатка

Определение элементного состава (содержание C, H, N, S) ОСВ до и после торрефикации производилось на анализаторе элементного состава «Elementar Vario MACRO Cube» на сухое состояние. Содержание кислорода на сухое состояние рассчитывалось исходя из материального баланса:

$$O = 100 - (C + H + N + S + A), \quad (1)$$

Где C, H, N, S, A – содержание углерода, водорода, азота, серы и зольность сырья, выраженные в % в расчете на сухое состояние.

Зольность *A* определялись с помощью термогравиметрического анализа (ТГА) с использованием термоанализатора SDT Q600.

Для определения энергетической ценности сброженного ОСВ как топлива необходимо рассчитать низшую теплоту сгорания. Низшая теплота сгорания на исходную сухую массу (Q_n , кДж/кг) для твердых топлив определяется по эмпирической формуле Д.И. Менделеева (Куфтов, 2006):

$$Q_n = 339C + 1030H - 108(O - S) + 25W \quad (2)$$

где W – влажность, %.

Предел гигроскопичности определяется по ГОСТ 16483.32-77.

Для оценки свойств исходного сырья в таблице 1 приведены результаты измерения элементного состава и рассчитанная низшая теплота сгорания.

Таблица 1. Элементный состав и низшая теплота сгорания сброженного ОСВ (на сухую массу)

C, %	H, %	N, %	S, %	O, %	A, %	Q_n , кДж/кг
37,6 1	5,2 3	5,9 7	1,4 3	18,2 6	31,5 0	16322

Содержание углерода в осадке сравнимо с количеством углерода в древесине: для хвойной древесины характерно 50,5% содержания углерода, для лиственной – 49,6% (Козлов, 1954). По низшей теплоте сгорания ОСВ так же сопоставим с древесиной: для хвойных пород это 18799 кДж/кг, для лиственных – 18397 кДж/кг (Козлов, 1954).

Данные таблицы 1 показывают, что в осадке после анаэробного сбраживания остается энергопотенциал, в связи с чем, следует вывод, что целесообразно использовать сброженный ОСВ в качестве твердого топлива.

Результаты экспериментального исследования

Изменения элементного состава остатка после торрефикации приведены в таблице 2.

Таблица 2. Элементный состав ОСВ после торрефикации (на сухую массу), %Таблица 2

T_t	C	H	N	S	O	A
220°C	42,08	4,93	6,30	1,27	9,02	36,40
300°C	42,66	4,14	5,70	1,10	5,11	41,30

Таким образом, в результате данного вида термической обработки наблюдается повышение содержание углерода в сырье, не зависящее от температуры торрефикации. Однако по изменению содержания зольности можно отметить, что меньшая температура торрефикации предпочтительней для обработки ОСВ.

Сравнение показателей низшей теплоты сгорания и предела гигроскопичности до и после торрефикации наглядно представлены на рис. 3.

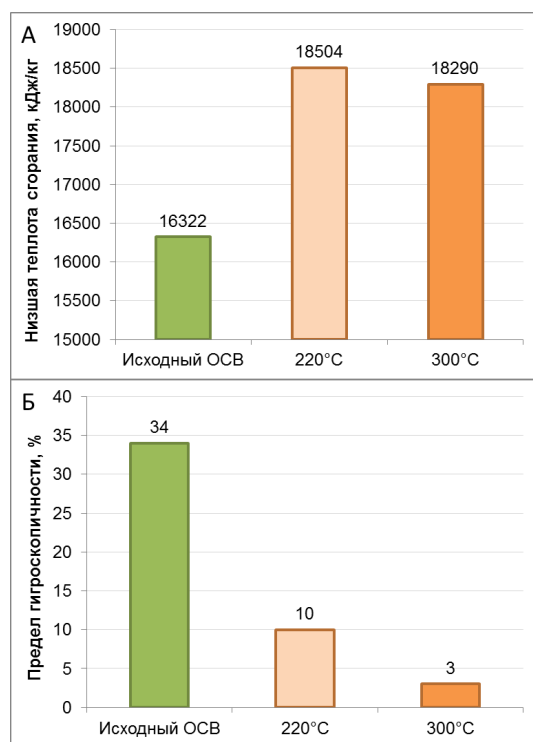


Рис.3. Низшая теплота сгорания (А) и предел гигроскопичности (Б) для исходного и торрефицированного сырья.

Выводы

В результате экспериментального исследования определено, что в зависимости от температуры термической обработки осадка сточных вод улучшаются свойства гигроскопичности материала: при температуре торрефикации в 220°C предел гигроскопичности уменьшается в 3,4 раза, в то время как при температуре торрефикации в 300°C – в 11,3 раза (сравнение пред-

ставлено на рис. 3). Однако рост температуры торрефикации оказывает на низшую теплоту сгорания отрицательный эффект, который является незначительным, но позволяет сделать вывод о нецелесообразности применения процесса торрефикации к сброженному ОСВ при выше 220°C.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.613.21.0078, уникальный идентификатор RFMEFI61317X0078).

Список литературы

1. Решетов Н.Г., Олейник А.С. Проблемы очистки и утилизации осадков сточных вод // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2001 - № 1 – С. 114-116.
2. Кувшинов В.В. Изменение мощностных характеристик фотоэлектрических установок при различных климатических факторах / Кувшинов В.В. // Энергетические установки и технологии. 2017. Т. 3. № 2. С. 61-66.
3. Кувшинов В.В. Исследование режимов работы термофотоэлектрических установок/ Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Парахнич С.А., Буланов А.И. // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4. № 1. С. 95-99.
4. Кувшинов В.В. Использование термофотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя / Е.Г. Какушина, А.Д. Васильев, А.А. Горецкий // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 51-57.
5. Протасов В.Ф. Экология, здоровье и природопользование в России. – М.: Финансы и статистика, 1995. – 528 с.
6. Лотош В.Е. Переработка Отходов природопользования. / Учебное издание. – Екатеринбург: Полиграфист, 2007. – 503 с.
7. Инженерное оборудование зданий и сооружений: Энциклопедия/Гл.ред. С.В.Яковлев. — М.: Стройиздат, 1994. — 512 с.
8. Канализация населенных мест и промышленных предприятий: Справочник проектировщика / под ред. В.Н. Самохина. – М.: Стройиздат, 1981. – 629 с.
9. Козлов В. Н., Нимвицкий А. А. Технология пирогазетической переработки древесины: Учебник для хим.-технол. фак. лесотехн. и лесохоз. вузов.- Москва ; Ленинград : Гослесбумиздат, 1954. – 620 с.
10. Куфтов А. Ф. Топливо и топливосжигающие устройства тепловых агрегатов общепромышленного назначения: учебное пособие; Московский гос. технический ун-т им. Н. Э. Баумана. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 42 с.

References

1. Reshetov N.G., Oleinik A.S. Problems of treatment and disposal of sewage sludge // Bulletin of Voronezh State University. Seria: Geography. Geoecology, 2001 - No. 1 - S. 114-116.
2. Kuvshinov V.V. Change in power characteristics of photo-electric installations at various climatic factors / V.V. Kuvshinov // Power plants and technologies. 2017. T. 3. No. 2. P. 61-66.
3. Kuvshinov V.V. Investigation of operating modes of thermophotovoltaic installations / V.V. Kuvshinov, E.G. Kakushina., S.A. Parakhnich, A.I. Bulanov // Power Plants and Technologies. 2018. T. 4. No. 1. P. 95-99.
4. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic plants to provide thermal and electrical energy of Sevastopol / E. Kakushina, A. Vasiliev. A. Goreckii // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 51-57.
5. Protasov V.F. Ecology, health and nature management in Russia. - M.: Finance and Statistics, 1995. - 528 p.
6. Lotosh V.E. Recycling of environmental waste. / Educational Edition. - Yekaterinburg: Po-writer, 2007. -- 503 p.
7. Engineering equipment of buildings and structures: Encyclopedia / Gl.red. S.V. Yakovlev. - M.: Stroyizdat, 1994Б. – 512 p.
8. Sewerage of populated areas and industrial enterprises: Designer Handbook / ed. V.N. Samokhina. - M.: Stroyizdat, 1981. – 629 p.
9. Kozlov V. N., Nimvitsky A. A. Technology of pyro-genetic processing of wood: a Textbook for chemical and technological. Fak. forestry technician. and leshoz. universities.- Moscow; Leningrad: Gosles-bumizdat, 1954.- 620 p.
10. Kuftov A. F. Fuel and fuel-burning devices of thermal units for industrial purposes: a training manual; Moscow state. Technical University N.E. Bauman. - M.: Publishing House of MSTU. N.E. Bauman, 2006. -- 42 p.

УДК 620.9:33

Направления развития энергетики

В.М. Зайченко¹, А.А. Чернявский², В.В. Кувшинов³, Е.Г. Какушина⁴,
С.А. Абейдулин⁵

Объединённый институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН),

Москва, 125412, Россия, ¹zaitch@oivtran.ru, ²chernavskii@oivtran.ru

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ³kuvshinov.vladimir@gmail.com, ⁴little@mail.ru, ⁵abeidylin@mail.ru

Статья поступила 26.09.2019 г.; после доработки 30.09.2019 г.

Аннотация

В статье дается анализ изменений в структуре мировой власти на современном этапе. Основные причины этих изменений представлены. Рассмотрены сравнительные характеристики традиционных и нетрадиционных генерирующих объектов. Показаны существенные преимущества и перспективы использования возобновляемых источников в российской энергетике. Рассмотрены причины недостаточных темпов переориентации власти в Российской Федерации на технологии современной генерации.

Ключевые слова: Анализ изменений в структуре мировой мощи на современном этапе, рассматриваются условные и нетрадиционные генерирующие объекты, возобновляемые источники, технологии современных поколений.

Energy development directions

V.M. Zaichenko¹, A.A. Chernyavskiy², V.V. Kuvshinov³, E.G. Kakyshina⁴,
S.A. Abeydulin⁵

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences (OIVT RAS),

Moscow, 125412, Russia, ¹zaitch@oivtran.ru, ²chernavskii@oivtran.ru

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.

³kuvshinov.vladimir@gmail.com, ⁴little@mail.ru, ⁵abeidylin@mail.ru

Received 26.09.2019 y.; received in final form 30.09.2019 y.

Abstract

In the report the analysis of changes in structure of world power at the present stage is given. The main reasons for these changes are presented. Comparative characteristics of the traditional and nonconventional generating objects are considered. Essential advantages and prospects of use of renewable sources in the Russian power are shown. The reasons of insufficient rates of reorientation of power in the Russian Federation on modern generation technologies are considered.

Keywords: The analysis of changes in structure of world power at the present stage is given, traditional and nonconventional generating objects, renewable sources, on modern generation technologies are considered.

Введение

В последние годы структура мировой энергетики претерпевает значительные изменения, продиктованные следующими обстоятельствами:

- интенсивное развитие энергетических систем на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ);
- широкое распространение распределённой генерации энергии;

- отрицательное влияние традиционных способов получения энергии на природное равновесие;
- настоятельная необходимость повышения экономической эффективности инвестиций в энергетику, снижение темпов роста стоимости электрической и тепловой энергии;
- истощение легкодоступных запасов органического и ядерного топлив и их удорожание в связи с увеличением затрат на добычу.

Традиционная тепловая энергетика

Традиционная тепловая энергетика, доля которой в общем энергобалансе России составляет около 70%, является и самым большим техногенным источником вредных выбросов. Наибольшие запасы органического топлива на земле – это каменный и бурый угли. Именно на угольных электростанциях имеют место наибольшие вредные выбросы.

Работе ТЭС сопровождается значительными тепловыми выбросами. КПД большей части существующих крупных паротурбинных ТЭС составляет 38...40%. Новые ТЭС с применением парогазовых технологий имеют КПД 55...60%. Т.е. 40...60% энергии сжигаемого на ТЭС топлива выбрасывается в окружающую среду. Это способствует увеличению среднегодовой температуры в атмосфере и на поверхности Земли. Как известно, увеличение этой температуры даже на доли градуса чревато значительными последствиями.

По данным, утвержденного в 2017 г. Проекта энергетической стратегии РФ до 2035 г. [1] доля ТЭС в энергобалансе России планируется на уровне 67,6%. При этом объём вредных выбросов от ТЭС составит 2,6 млн. т в год, а парниковых газов – 580 млн. т в год, несмотря на принимаемые меры, направленные на сокращение этих выбросов.

Сооружение крупных ГЭС

Сооружение крупных ГЭС, доля которых в общем энергобалансе страны составляет ~ 20%, также сопряжено с отрицательным влиянием на природное равновесие. Водохранилища, необходимые для регулирования производительности ГЭС, занимают значительные территории. Часто при заполнении водохранилищ затопляются значительные сельскохозяйственные территории, лесные массивы, а также жилые поселения. Плотины ГЭС, перегораживающие

русла рек, нарушают условия миграции рыб и, несмотря на сооружение специальных рыбоподъемников, все-таки приводят к заметному уменьшению количества рыбы в зоне размещения ГЭС.

АЭС

АЭС – электростанции, вызывающие наибольшие экологические проблемы и протесты населения как в России, так и за рубежом. Особенно после крупных аварий на АЭС «Three Mile Island» в США в 1976 г., на Чернобыльской АЭС в России в 1986 г., на АЭС «Фукусима» в Японии в 2011 г. Периодичность таких аварий с выбросом радиоактивных веществ составляет 22...25 лет. Если количество ядерных реакторов будет увеличиваться, то частота радиационных аварий, очевидно, будет возрастать.

Необходимо также учитывать, что КПД ядерных реакторов меньше, чем парогенераторов ТЭС. В силу этих причин работа АЭС сопровождается большими тепловыми выбросами, чем при работе тепловых электростанций.

Если говорить об экономической эффективности АЭС, то следует иметь в виду, что строительство АЭС обходится в 2,0...2,5 раза дороже угольных паротурбинных ТЭС и в 3,0...3,5 раза дороже современных ТЭС с парогазовыми технологиями [2]. В докладе Международного энергетического агентства ИЕА "Обновленная оценка капитальных затрат станций, производящих электроэнергию", еще в 2010 г. удельные инвестиции в новые атомные электростанции были оценены в размере 5339 US\$/кВт. Соответствующие этим затратам высокие объёмы амортизационных отчислений ложатся тяжелым бременем на себестоимость отпускаемой АЭС электроэнергии.

Необходимость учёта в расчётах себестоимости энергии АЭС затрат на демонтаж АЭС после окончания срока службы, сопоставимых с затратами на их строительство, приводит к тому, что себестоимость производства электроэнергии на АЭС оказывается выше, чем на ТЭС и ГЭС. Рассуждения о дешевизне атомной энергии не имеют оснований.

Несмотря на все эти факты в РФ продолжается строительство новых ядерных энергоблоков. А для энергоблоков, отработавших свой нормативный 30-летний ресурс, концерн «Росэнергоатом» искивает разные пути продления времени их эксплуатации на 10...15 лет, чтобы сегодня сэкономить средства на снятие таких энергоблоков с эксплуатации и получить доба-

вочный доход от их эксплуатации. А этот путь чреват грядущими авариями на АЭС в связи со снижением их надежности в пострасчётном периоде.

Многие страны мира теперь отказываются от использования АЭС. До настоящего времени АЭС эксплуатировались в 31 стране. Сегодня Италия закрыла все имевшиеся АЭС и полностью отказалась от ядерной энергетики [3]. Бельгия, Германия, Испания, Нидерланды, Тайвань, Швейцария, Швеция проводят мероприятия по планомерному закрытию АЭС. Литва и Казахстан временно прекратили использование ядерной энергетики. Австрия, Куба, Ливия, КНДР, Польша после аварии на «Фукусиме» не стали завершать начатое строительство своих первых АЭС. Также отказались от программ развития атомной энергетики Австралия, Австрия, Азербайджан, Бельгия, Гана, Греция, Грузия, Дания, Ирландия, Латвия, Лихтенштейн, Люксембург, Малайзия, Мальта, Новая Зеландия, Норвегия, Португалия, Филиппины [3].

К настоящему времени в мире закрыты 164 атомных реактора. Пик производства ядерной энергии был зафиксирован в 2006 г. (2660 ТВтч). Доля ядерной энергетики в мировом производстве электроэнергии снизилась с 17,6% в 1996 г. до 10,7% в 2015 г. [3]. Агентство Bloomberg New Energy Finance прогнозирует общее падение доли АЭС в мире до 4% к 2040 г.

Возобновляемые источники энергии

В то же время отмечается значительный рост энергетических мощностей с использованием ВИЭ. Это связано с резким падением цен в последние 5...7 лет на оборудование для возобновляемой энергетики. В первую очередь, это относится к кремниевым фотоэлектрическим модулям (ФЭМ), являющихся основой большинства современных солнечных электростанций (СЭС). Теперь при стоимости ФЭМ 300...600 US\$/кВт, они являются самыми дешевыми источниками генерации электрической энергии. И, по мнению многих экспертов, сейчас уже становится экономически невыгодным строительство АЭС и ТЭС, по крайней мере, в странах ЕС, в Китае, в Индии, а также в южных регионах России [4].

С 2017 г. ВИЭ являются самым быстрокупаемым источником энергии. За это время было введено в эксплуатацию более 150 ГВт новых солнечных и ветровых мощностей в мире – больше, чем объектов традиционной энерге-

тики. В 2018 г. были введены в строй СЭС суммарной мощностью более 100 ГВт, ВЭС – суммарной мощностью 60 ГВт. Привычными стали цены ~ 0,03 US\$/кВтч на электрическую энергию на установках с ВИЭ, создаваемых без бюджетной поддержки. В Саудовской Аравии цена электроэнергии ВЭС составила 0,0234 US\$/кВтч, на мексиканских СЭС зафиксирована цена 0,0197 US\$/кВтч: сегодня ВИЭ уверенно выходят на самоокупаемость.

Главной движущей силой в реализации крупномасштабных проектов в солнечной энергетике стали Китай и Индия. По данным IEEFA, в Индии и Китае находятся самые крупные в мире объекты солнечной энергетики – мощностью 300...1500 МВт. В целом, за последние 10 лет Китай увеличил мощность СЭС в 800 раз.

Быстрое развитие возобновляемой энергетики наблюдается в Японии, в США, где ставят целью сохранение природных запасов углеводородов; в странах Европы, где отсутствуют достаточные ресурсы органического топлива.

В настоящее время общая доля энергии, получаемой за счёт ВИЭ, составляет: в Дании – 42%, в Германии – 33%, в Австрии – 27%, в Великобритании – 21%, в России – 1%. В нашей стране еще не наступило понимание актуальности развития ВИЭ. В многом это связано с наличием огромных запасов углеводородов, особенно каменного угля: разведанных его залежей хватит более чем на 300 лет при теперешних темпах расходования. Но уже и в России последние несколько лет наблюдается быстрый рост объёмов внедрения в солнечной энергетике. Общая установленная мощность введенных в действие СЭС к 2019 г. превысила 200 МВт. К тому же, с воссоединением Крыма, Россия стала также обладательницей крупнейшего, даже по мировым масштабам, крымского комплекса фотоэлектрических СЭС – более 300 МВт [5,6,7].

Во многих странах энергия, получаемая с использованием ВИЭ, дешевле чем от ТЭС и АЭС. В этих странах значительными темпами идет отказ от использования атомной энергии, а также «декарбонизация» энергетики – постепенный отказ от использования бурого и каменного угля. Сейчас в Германии обсуждается вопрос о необходимости закрытия 14 крупных угольных ТЭС. Происходит замещение электростанций на угле возобновляемой энергетикой.

По сообщениям, опубликованным в июне 2018 г в Elektrovest.net, прогнозируется закрытие угольных электростанций еще в целом ряде

государств. В Великобритании планируют закрыть все угольные электростанции к 2025 г. с заменой их на газовые ТЭС и ВИЭ. В Нидерландах будут закрыты все ТЭС на угле, включая даже новые, введенные в 2015 г. Для достижения целей, поставленных Парижским соглашением, в 2015 г. были закрыты 5 угольных энергоблоков, оставшиеся 5 – на очереди. В Португалии в летний период 100% потребности в электроэнергии обеспечивается за счёт ВИЭ. Круглогодичное обеспечение за счёт ВИЭ планируется с 2040 г. В Австрии энергетической стратегией предусмотрен полный переход на «зеленую» энергетику к 2030 г. Южная Корея закрывает 10 устаревших угольных ТЭС к 2025 г. Мексика планирует получение 50% энергии за счёт ВИЭ к 2034 г. Коста-Рика в 2016 г. полностью перешла на использование ВИЭ.

В целом, по прогнозам, опубликованным в Глобальном отчёте Центра REN21, использование бурого угля будет прекращено к 2035 г., каменного угля – к 2045 г., нефти, газа, ядерного топлива – к 2050 г. (рис.1).

Одной из важных составляющих в развитии ВИЭ являются успехи последних лет в создании систем аккумулирования большого количества электрической энергии [5,6,8,9].

Один из крупнейших проектов ВИЭ-электростанции, оснащаемой системой аккумулирования, начала внедрять во Французской Гвиане (северо-восток Южной Америки) компания HDF Energy (Hydrogene de France – «Французский водород». Солнечная электростанция мощностью 55 МВт будет оснащена накопителем энергии ёмкостью 140 МВтч.

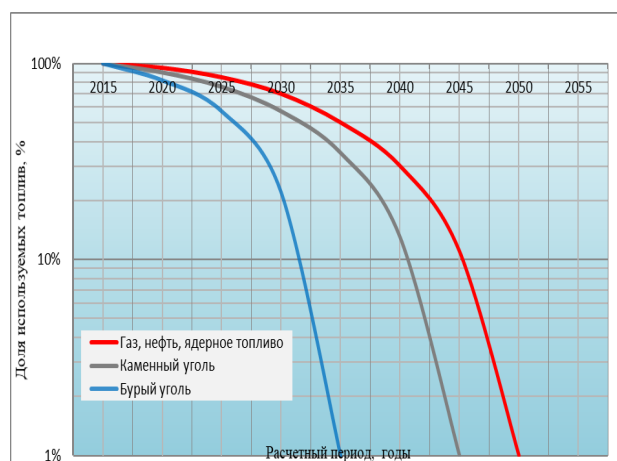


Рис.1. Прогноз сокращения использования органического и ядерного топлива

Высокоёмкие накопители электроэнергии достаточно дороги. И даже самые дешевые из них увеличивают общую стоимость электростанций на базе ВИЭ в 1,5...1,8 раза, заметно снижая их рентабельность. Рациональным является создание комбинированных электростанций, в которых различные виды ВИЭ, дополняя друг друга, обеспечивают возможность минимизировать потребность в аккумулировании электроэнергии. Например, удачным для выравнивания годовой выработки электроэнергии является сочетание ветроэлектрических и солнечных электроустановок.

На рис.2 в качестве примера показано, как можно обеспечить почти равномерную выработку электроэнергии в течение всего года на комбинированной солнечно-ветровой установке.

Ёмкость накопителя электроэнергии для такой установки оказывается в десятки раз меньше, чем для случаев, когда необходимо обеспечить сезонное аккумулирование энергии отдельно для солнечной или для ветровой установки.

Для снижения требований к ёмкости накопителей электроэнергии можно строить комбинированные системы и с другими видами ВИЭ, например, по схемам ВЭС–ГЭС, СЭС–ГЭС, ВЭС–ГеоТЭС, СЭС–ГеоТЭС, ВЭС–биоТЭС, СЭС–биоТЭС и т.п., в зависимости от видов ВИЭ, преобладающих на территории, где планируется размещать электростанции с использованием ВИЭ. Перспективным является использование энергии биомассы.

Практически почти на всей территории России можно найти те или иные виды биомассы для использования в качестве местного исходного сырья для получения электроэнергии. Это могут быть торф, древесные и сельскохозяйственные отходы, отходы жизнедеятельности различных видов, в том числе твёрдые коммунальные отходы (ТКО).

Для России биоэнергетика является одним из наиболее перспективных видов использования возобновляемых источников энергии.

И, именно в области энергетического использования биомассы в сочетании с водородными технологиями, в России предложены новые эффективные технические решения, которые выводят страну на передовые рубежи [1,7,10,11].

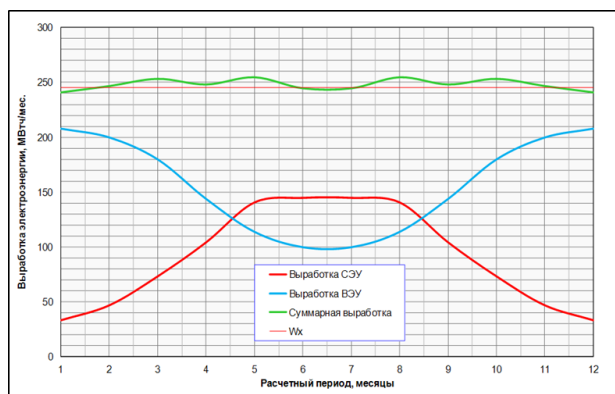


Рис.2. Годовой ход суммарной выработки электроэнергии комбинированной солнечно-ветряной установкой

Общий технический потенциал биомассы в РФ оценивается в 15-20 тысяч МВт. По данным институтов ОИВТ РАН и «Ростовтеплоэлектропроект» [4] стоимость одного кВт установленной мощности энергетических установок с использованием биотоплива находится в пределах от 2000 до 4000 евро – на уровне новых ТЭС на традиционном топливе.

Потенциально возможное получение электрической энергии из биотоплива в РФ составляет более 150 тысяч ГВтч/год, тепловой энергии – 344 ГВтч/год.

Эффективная технология конверсии биомассы предложена ОИВТ РАН [1,4]. Эта технология позволяет получать энергетический газ, состоящий на ~ 90% из водорода и окиси углерода. Получаемая смесь газов практически не содержит смол и может быть без дополнительной очистки использована в качестве топлива для газопоршневых агрегатов.

Технология ОИВТ РАН обеспечивает высокую степень конверсии перерабатываемой биомассы в энергетический газ. В существующих технологиях пиролиза эта величина не превышает 18%, в технологии ОИВТ РАН достигает 78%. Суммарный выход горючих газов при переработке древесных и сельскохозяйственных отходов составляет 1,4 м³ на 1 кг биомассы, а средняя теплота сгорания – около 11,5 МДж/м³.

Россия является одним из ведущих экспортеров древесного топлива: на мировые рынки из России отправляется более 90% всего отечественного выпуска топливных гранул – пеллет [3,4]. Внутренний же рынок топливных гранул в России еще не сформирован, но начинает интенсивно развиваться. Под этот вид топлива разработаны и выпускаются серийно автоматические котлоагрегаты.

Большие преимущества пеллетизированное топливо из биомассы, в том числе из древесины, приобретает, если провести его обработку при температуре 250...300°C без доступа кислорода – торрефикацию. При этом на 25-30% увеличивается теплота сгорания, возрастает их насыпная плотность, пеллеты становятся гидрофобными. Т.е. не поглощают влагу при хранении на воздухе. Научные основы процесса торрефикации разработаны в ОИВТ РАН [4].

Отметим, что растительная биомасса является экологически нейтральным топливом: потребление CO₂ из атмосферы при росте растений соответствует эмиссии CO₂ при их сжигании.

Существующие экономические преференции использования ВИЭ позволяет строить новую энергетику с меньшими удельными инвестициями в 1 кВт установленной мощности и с получением более дешевой электрической энергии. Результаты сравнительных расчетов основных параметров для традиционных и нетрадиционных электрических станций в существующих российских условиях приведены в табл. 1.

Сравнение выполнено для АЭС, ТЭС, работающей на угле, ТЭС на природном газе, ГЭС, а также сетевых ВЭС и СЭС – без аккумулирования.

За основу для сравнения принята условная АЭС установленной мощностью 1000 МВт, работающая в базовом режиме при среднем КИУМ=70%, что соответствует годовому времени использования установленной мощности 6132 часа. Все остальные генерирующие мощности имеют среднестатистические КИУМ меньше, чем АЭС, как показано в табл.1.

Расчетный отпуск электроэнергии условной АЭС составляет 5825,4 ТВтч/год. Для адекватного сравнения принимается такой же расчетный отпуск электроэнергии и для остальных типов электростанций. Чтобы выполнить это условие при значительной разнице в КИУМ для разных технологий генерации, оказалось необходимым принять следующие значения установленных электрических мощностей:

- для ТЭС на угле - 1097,2 МВт;
- для ТЭС на природном газе - 1647,1 МВт;
- для ВЭС - 2000,0 МВт;
- для СЭС - 2800,0 МВт
- для ГЭС - 1758,8 МВт.

Отметим, что, несмотря на то, что требуемые мощности ВЭС и СЭС являются значительно большими, чем для всех прочих электростанций, сооружение ВЭС и СЭС требует при сложившейся рыночной конъюнктуре, самых

малых инвестиций. При этом себестоимость отпускаемой электроэнергии на ВЭС и СЭС также имеет самые низкие значения.

Если планировать тариф на отпуск электроэнергии на оптовый рынок энергии и мощности в размере 70 US\$/МВтч – с минимальным превышением наибольшей себестоимости из ряда рассматриваемых генерирующих источников, то полные сроки окупаемости инвестиций составят (табл.1): для АЭС – 57,8 года, для ТЭС на угле – 39,7 года, для ТЭС на природном газе – 70,5 года, для ГЭС – 46,2 года, для ВЭС – 14,2 года, для СЭС – 12,0 лет. Только ВЭС и СЭС будут иметь приемлемые сроки окупаемости, не превышающие половину срока службы станции. Все остальные технологии генерации не обеспечивают окупаемость в течение всего срока жизни этих объектов, составляющего, как правило, 40 лет.

Таблица 1. Сравнительная оценка основных показателей электростанций

Наименование параметров	Единица измерения	Значение параметров					
		АЭС	ТЭС		ВИЭ		
			на угле	на газе	ГЭС	ВЭС	СЭС
1.	2.						
Коэффициент использования установленной мощности, КИУС	%	70,0	63,8	42,5	39,8	35,0	25,0
Приведенная установленная мощность, N	МВт	1000	1097	1647	1759	2000	2800
Число часов использования установленной мощности, T	ч/год	6132	5589	3723	3486	3066	2190
Выработка электроэнергии, $W_{эл.} = N \cdot T / 1000$	ТВт ч/год	6132	6132	6132	6132	6132	6132
Себесто-	US \$ МВт ч	60,3	59,12	65,66	55,28	34,2	30,8

имось отпускае- мой элек- торознер- гии, СС = 1000 Из/Womn							
--	--	--	--	--	--	--	--

При этом для всех энергообъектов, кроме ВЭС и СЭС, чистый доход за весь период эксплуатации является отрицательной величиной, индекс доходности – менее 1, рентабельность – не выше 2,5%. Естественно, что при таких значениях экономических критериев вкладывать инвестиции в эти проекты нет смысла. Отметим, что, несмотря на то, что требуемые мощности ВЭС и СЭС являются значительно большими, чем для всех прочих электростанций, сооружение ВЭС и СЭС требует при сложившейся рыночной конъюнктуре самых малых инвестиций. При этом себестоимость отпускаемой электроэнергии на ВЭС и СЭС также имеет самые низкие значения.

Приемлемые финансово-коммерческие показатели для строящихся или реконструируемых электростанций обеспечивают с помощью государственных субсидий путем. Для этих целей используется, так называемые договора о предоставлении мощности (ДПМ). В табл.1 представлен пример реализации ДПМ. При этом, чтобы сравнение было корректным, в расчетах были приняты равные условия для всех типов электростанций: во всех случаях принято одно и то же повышенное значение эквивалентного одноставочного тарифа на отпуск электроэнергии, равное 120 US\$/МВтч. В этих условиях полные сроки окупаемости инвестиций становятся удовлетворительными для всех рассматриваемых вариантов. Но наилучшая и весьма удовлетворительная окупаемость будет иметь место при инвестировании средств в строительство ВЭС и СЭС. Эти же виды электростанций обеспечивают и наибольший чистый доход на вложенный капитал, наибольший индекс доходности, наивысшую рентабельность инвестиций. Именно поэтому многие энергетические компании Мира пришли к выводу, что нет уже смысла, по экономическим соображениям, вести строительство АЭС, ТЭС и крупных ГЭС, а предпочтение следует отдавать технологиям на базе ВИЭ.

Сегодня модернизация Российских ТЭС на базе традиционных технологий с заменой турбин и котлов, отработавших свой ресурс на новые, пусть даже с несколько лучшими парамет-

рами, приведет только к еще большему отставанию нашей энергетики от мирового уровня. Устанавливая сегодня новое паротурбинное оборудование взамен изношенного, мы обрекаем себя на использование устаревающих энергетических технологий еще, как минимум, на 40 лет – на период, равный сроку службы этого оборудования. И, если еще всего 3-4 года назад эти вопросы не стояли так остро, то теперь потеря времени без внедрения новых технологий на основе ВИЭ уже недопустима.

Но отметим и другую сторону использования ВИЭ в энергетике. Сейчас развитие возобновляемой энергетики идет в России стихийно. Многие компании хаотично, руководствуясь только погоней за прибылями от использования «бесплатной» энергии от ВИЭ, сооружают солнечные, ветровые установки, малые гидроустановки, станции на биомассе самой разной мощности на различных территориях, не координируя свои действия ни друг с другом, ни с планами развития энергетики России в целом. При этом уже заметными становятся потери прибыли энергетических компаний в области традиционной энергетики. Бессистемное внедрение новых энергетических мощностей привело к тому, что целый ряд существующих электростанций вынуждено эксплуатироваться с нагрузкой всего 10...12%. Эти станции, в условиях сложившейся теперь частнособственнической структуры энергетики, теряют не только прибыль, но даже и возможность содержать саму станцию в состоянии высокой готовности к работе. Аналогичные явления в странах ЕС привели сегодня к потерям в энергетике порядка 20 трлн. US\$ [4]. Это говорит о том, что стихийное распространение ВИЭ стало недопустимым.

Следует также помнить и о том, что устойчивость и надежность работы энергетических систем регионов и страны в целом зависит от доли использования ВИЭ в общем объеме системы, пока достаточно неразвиты высокоёмкие устройства аккумулирования электрической энергии. Всех этих проблем можно избежать, если заранее чётко планировать скоординированное размещение новых мощностей в регионах с постепенным выводом устаревших энергогенераторов, с заменой их на новое оборудование на базе ВИЭ, с переводом множества существующих в стране ГЭС в режим гидроаккумулирования (ГАЭС) и переобучением коллективов ТЭС и АЭС для работы с новым оборудованием на базе ВИЭ.

Становится очевидным, что действующие ныне «Проект энергетической стратегии Рос-

сийской Федерации на период до 2035 года» [1] и «Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2035 года» [4], в которых перспективная структура энергетических мощностей сохранена на сегодняшнем уровне: с большей долей производства электроэнергии за счёт органического топлива, уже не отвечают мировым тенденциям, социально-экономическим потребностям страны и требуют коренного пересмотра.

Напомним, что, в соответствии с решениями Парижской конференции 2015 года по климату [1,4], перед мировым сообществом поставлена цель: ограничить рост температуры на планете к 2050 г. в пределах 2 оС. Эта цель может быть достигнута только в том случае, если к 2050 г. использовать не более 10% от уже имеющихся запасов углеводородных топлив. В рамках обозначенных ограничений примерно 80% мировых запасов угля, 50% природного газа и 30% нефти должны будут остаться неиспользованными.

Если данные подходы справедливы, то затраты на разведку и освоение новых месторождений ископаемых топлив не имеют смысла. И необходимо финансировать не разведку и освоение новых месторождений природных топлив, а исследования, направленные на создание новых методов получения энергии без использования этих топлив.

Сегодня основные статьи дохода Государственного бюджета - это отчисления от прибылей корпораций, продающих за границу газ, нефть и уголь. Спрос на ископаемые топлива будет быстро сокращаться. У нас остается не более 10–15 лет для того, чтобы найти источники получения доходов, отличные от экспорта природных углеводородов.

Основная доля российского экспорта углеводородов приходится на страны ЕС. Развитие экономики этих стран приводит к значительному росту потребности в электрической энергии и биотопливе. Поэтому, само собой напрашивается и решение: планировать источники бюджетного дохода именно за счёт производства в России и экспорта за рубеж энергетической продукции взамен сырьевых компонентов.

Выводы

Использование возобновляемых источников энергии стало нормой практически во всем мире. Страны же СНГ – исключение из этого правила. Это привело к серьезному отставанию

СНГ и, в частности, РФ при создании современной базы развития энергетики.

Следует также помнить и о том, что устойчивость и надежность работы энергетических систем регионов и страны в целом зависят от доли использования ВИЭ в общем объеме системы, пока достаточно неразвиты высокоёмкие устройства аккумулирования электрической энергии. Всех этих проблем можно избежать, если заранее чётко планировать скоординированное размещение новых мощностей в регионах с постепенным выводом устаревших энергогенераторов, с заменой их на новое оборудование на базе ВИЭ, с переводом множества существующих в стране ГЭС в режим гидроаккумулирования (ГАЭС) и переобучением коллективов ТЭС и АЭС для работы с новым оборудованием на базе ВИЭ.

Становится очевидным, что действующие ныне «Проект энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» и «Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2035 года», в которых перспективная структура энергетических мощностей сохранена на сегодняшнем уровне: с большей долей производства электроэнергии за счёт органического топлива, уже не отвечают мировым тенденциям, социально-экономическим потребностям страны и требуют коренного пересмотра.

Напомним, что, в соответствии с решениями Парижской конференции 2015 года по климату, перед мировым сообществом поставлена цель: ограничить рост температуры на планете к 2050 г. в пределах 2 °С. Эта цель может быть достигнута только в том случае, если к 2050 г. использовать не более 10% от уже имеющихся запасов углеводородных топлив. В рамках обозначенных ограничений примерно 80% мировых запасов угля, 50% природного газа и 30% нефти должны будут остаться неиспользованными.

Если данные подходы справедливы, то затраты на разведку и освоение новых месторождений ископаемых топлив не имеют смысла. И необходимо финансировать не разведку и освоение новых месторождений природных топлив, а исследования, направленные на создание новых методов получения энергии без использования этих топлив.

Сегодня основные статьи дохода Государственного бюджета - это отчисления от прибылей корпораций, продающих за границу газ, нефть и уголь. Спрос на ископаемые топлива будет быстро сокращаться. У нас остается не

более 10–15 лет для того, чтобы найти источники получения доходов, отличные от экспорта природных углеводородов.

Основная доля российского экспорта углеводородов приходится на страны ЕС. Развитие экономики этих стран приводит к значительному росту потребности в электрической энергии и биотопливе. Поэтому, само собой напрашивается и решение: планировать источники бюджетного дохода именно за счёт производства в России и экспорта за рубеж энергетической продукции взамен сырьевых компонентов.

Использование возобновляемых источников энергии стало нормой практически во всем мире. Страны же СНГ – исключение из этого правила. Это привело к серьезному отставанию СНГ и, в частности, РФ при создании современной базы развития энергетики.

Список литературы

1. «Проект энергетической стратегии РФ до 2035 года». – М.: Распоряжение правительства РФ от 09.06.2017 №1209-р.
2. Пергаменщик Б.К., Теличенко В.И., Темишев Р.Р., Возведение специальных строительных конструкций АЭС. – М.: МЭИ, 2011 – 240 с.
3. Отказ от ядерной энергетики. – [www.worldnuclearreport.org/The World nuclear Industry Status Report](http://www.worldnuclearreport.org/The_World_nuclear_Industry_Status_Report). 2016.
4. Зайченко В.М., Чернявский А.А., Автономные системы энергоснабжения. – М.: «Недра». 2015 – 285 с.
5. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В. // Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
6. Кувшинов В.В. Исследование режимов работы термофотоэлектрических установок/ Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Паракхнич С.А., Буланов А.И. // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4. № 1. С. 95-99.
7. Кувшинов В.В. Использование фотоэлектрической установки для обеспечения бесперебойной работы автономных потребителей /Е.Г. Какушина, Д.А. Чванова// Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 1. С. 62-67.
8. Кувшинов В.В. Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок при выработке тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхности / Е.Г. Какушина // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 45-50.
9. Кувшинов В.В. Использование термофотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя

- / Е.Г. Какушина, А.Д. Васильев, А.А. Горецкий // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 51-57.
10. Кувшинов В.В. Исследование сезонной работы промышленного фотоэлектрического модуля PS 250 / Е.Г. Какушина, Д.Д. Смирнова // Энергетические установки и технологии – 2017. Т. 3. № 1. С. 47-50.
11. Кувшинов В.В. Прозрачные защитные покрытия для комбинированных солнечных установок/ Е.Г. Какушина, Косий А.Г.// Энергетические установки и технологии – 2017. Т. 3. № 3. С. 73-78.

References

1. "The draft energy strategy of the Russian Federation until 2035." - M.: Order of the Government of the Russian Federation dated 09.06.2017 No. 1209-p.
2. Pergamenschik B.K. Construction of special building structures of nuclear power plants / Telichenko V.I., Temishev R.R.// - M.: MPEI, - 2011. pp. 240.
3. Refusal of nuclear power. - www.worldnuclearreport.org/The World nuclear Industry Status Report. 2016.
4. Zaichenko V. M. Autonomous energy supply systems / Chernyavsky A. A.// - M.: "The bowels." 2015. pp. 285.
5. Guryev V.V. Development of renewable energy sources in the power system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol / Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V.// Power plants and technologies - 2019.T. 5. No. 2. P. 90-93.
6. Kuvshinov V.V. Investigation of operating modes of thermophotovoltaic installations / V.V. Kuvshinov, E.G. Kakushina., S.A. Parakhnich, A.I. Bulanov // Power Plants and Technologies. 2018. T. 4. No. 1. P. 95-99.
7. Kuvshinov V.V. Use of photovoltaic plant to ensure the smooth operation of Autonomous consumers / E. Kakushina, D. Chvanova // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 1. pp. 62-67.
8. Kuvshinov V.V. Opportunities to improve the energy characteristics of solar plants in the production of thermal and electrical energy from one receiving surface / E. Kakushina // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 45-50.
9. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic plants to provide thermal and electrical energy of Sevastopol / E. Kakushina, A. Vasiliev. A. Goreckii // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 51-57.
10. Kuvshinov V.V. Investigation of seasonal operation of industrial photovoltaic module PS 250/ E. Kakushina, D. Smirnova // Journal of Sevastopol national University. - 2017. Vol. 3. No. 1. pp. 47-50.
11. Kuvshinov V.V. Transparent protective coating for a combined solar installations / E. Kakushina, A. Kocii // Journal of Sevastopol national University. - 2017. Vol. 3. No. 3. pp. 73-78.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК.621.31

Особенности применения объединенного регулятора потоков мощностиВ.В. Смирнов¹, Т.С. Старченко², М.А. Старченко³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹svadick@mail.ru, ²tausik.maxy@yandex.ru, ³warrior2me@gmail.com

Статья поступила 23.09.2019 г.; после доработки 25.09.2019 г.

Аннотация

В данной статье рассмотрен один из альтернативных способов регулирования потоков мощности - объединенный регулятор потоков мощности (ОРПМ). Описаны устройство и принцип действия ОРПМ. Рассмотрен принцип векторного регулирования, а также основные режимы работы ОРПМ и их особенности. Отмечены достоинства и недостатки данного способа управления линиями. Сделан вывод о целесообразности применения данного устройства.

Ключевые слова: объединенный регулятор потоков мощности, гибкие линии, векторное регулирование, модернизация энергосистемы.

Features of application of the unified power flow controllerV.V. Smirnov¹, T.S. Starchenko², M.A. Starchenko³FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia. ¹svadick@mail.ru, ²tausik.maxy@yandex.ru, ³warrior2me@gmail.com

Received 23.09.2019 y.; received in final form 25.09.2019 y.

Abstract

This article discusses one of the alternative ways of regulating power flows - the unified power flow controller (UPFC). The organization and principle of operation of the UPFC were described. The principle of vector regulation, as well as the main modes of operation of the UPFC and its features are considered. The advantages and disadvantages of this device are noted. It was concluded that the use of a bottom device is advisable.

Keywords: unified power flow controller, flexible lines, vector regulation, power system modernization.

Введение

На сегодняшний день одной из главных проблем электроэнергетики является проблема регулирования потоков мощности и при этом поддержания требуемого качества электроэнергии.

Существует множество технических решений данных вопросов, таких как: синхронные компенсаторы, управляемые шунтирующие реакторы, статические компенсаторы, фазоповоротные устройства, вставки постоянного тока и др.

Каждое из вышеперечисленных устройств оказывает определенное ограниченное воздействие на линию, однако для более эффективного воздействия на ее характеристики возникает необходимость установки на подстанции сразу нескольких устройств, что затруднено из-за необходимости создания сложной единой системы управления.

Такое широкое воздействие способно оказывать устройство, оказывающее так называемое векторное регулирование.

Данное устройство можно назвать объединенным регулятором потоков мощности

(ОРПМ), поскольку оно воздействует как на модуль, так и на фазу вектора напряжения.

Устройство и принцип действия

ОРПМ представляет собой вставку постоянного тока относительно небольшой мощности, состоящую из двух преобразователей напряжения ПН1 и ПН2, объединенных по постоянному току с общим конденсатором в этой цепи (рис.1). Данные преобразователи могут работать как в режиме выпрямителя или инвертора, так и потреблять или генерировать реактивную мощность.

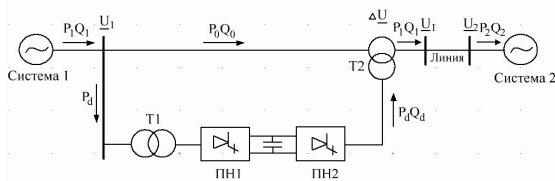


Рис.1 Объединенный регулятор потоков мощности.

Преобразователь ПН1 связан с шинами подстанции через трансформатор Т1, преобразователь ПН2 - с линией через трансформатор Т2, первичная (сетевая) обмотка которого включена в линию последовательно, а вторичная (вентильная) присоединена к преобразователю.

Принцип работы ОРПМ заключается в том, что в линию с помощью последовательной обмотки трансформатора Т2 вводится некоторое напряжение ΔU , фаза вектора которого может изменяться от нуля до 360° по отношению к напряжению фазы, в которую включена эта обмотка.

Напряжение в начале линии $\underline{U}_1'$ есть векторная сумма двух напряжений: на шинах подстанции $\underline{U}_1$ и напряжение последовательной обмотки трансформатора Т2 $\underline{\Delta U}$.

$$\underline{U}_1' = \underline{U}_1 + \underline{\Delta U}$$

Из формулы (1) видно, что изменение фазы напряжения $\underline{\Delta U}$ приводит к изменению фазы напряжения $\underline{U}_1'$ относительно напряжения конца линии $\underline{U}_2$ и, как следствие, к изменению передаваемой по линии активной мощности (рис.2):

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_L}, \quad (1)$$

где U_1 - напряжение в начале линии;
 U_2 - напряжение в конце линии;
 Z_L - сопротивление линии.

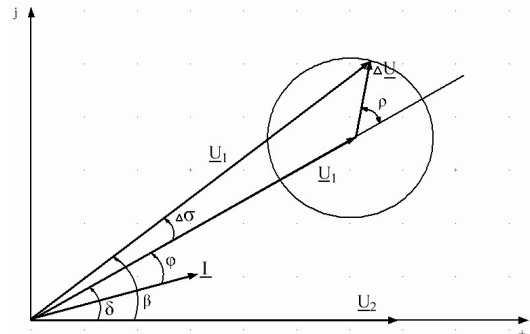


Рис.2 Векторная диаграмма регулирования.

Возможность изменения фазы напряжения $\underline{\Delta U}$ можно пояснить следующим образом. Предположим, что на вентильную обмотку трансформатора Т2 вместо преобразователя ПН2 будут последовательно включаться резистор r , конденсатор C , реактор L и источник активной мощности, имитирующий отрицательный резистор $-r$. Напряжение $\underline{\Delta U}$ в соответствии с указанной последовательностью будет совпадать с вектором тока фазы линии, отставать от него на 90° , опережать ток на 90° , быть смещенным по отношению к току на 180° (рис. 3).

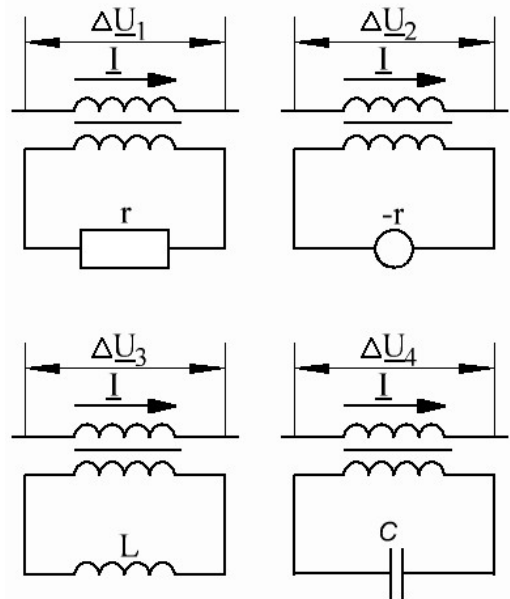


Рис.3 Различные сопротивления на вентильной обмотке трансформатора Т2

Если же на вентиляную обмотку трансформатора Т2 подключить устройство, которое будет создавать эффект некоторого комплексного сопротивления, у которого действительная и мнимая составляющие будут изменяться по определенному закону, то вектор $\underline{\Delta U}$ будет описывать окружность (рис. 4).

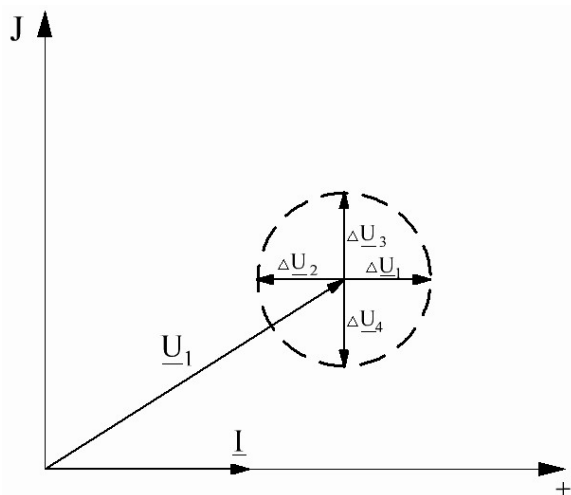


Рис.4 Векторная диаграмма.

Учтем теперь, что включение резистора означает потребление активной мощности трансформатором Т2 из линии, включение отрицательного резистора – ее генерацию в линию, включение конденсатора – генерацию реактивной мощности, индуктивной катушки – ее потребление.

Отсюда следует, что если в вентиляную обмотку трансформатора Т2 включить преобразователь, который может работать в режиме выпрямления (потребление активной мощности) и режиме инвертирования (ее генерация), а также потреблять реактивную мощность (индуктивность) или ее генерировать (емкость) в обоих этих режимах, то этот преобразователь полностью заменяет указанное комплексное сопротивление и конец вектора будет описывать окружность.

При этом необходимо обеспечить контур циркуляции активной мощности между преобразователем ПН2 и шинами подстанции, для чего используется преобразователь ПН1.

Особенности режимов работы ОРПМ

Рассматриваемый регулятор ОРПМ может иметь три характерных режима:

1. Режим регулятора напряжения, когда вектор $\underline{\Delta U}$ совпадает с вектором $\underline{U}_1$, при этом

угол $\rho=0$. В этом случае напряжение в начале линии $\underline{U}_1'$ равно алгебраической сумме напряжений $\underline{U}_1$ и $\underline{\Delta U}$ (рис.5). Регулирование передаваемой мощности осуществляется только за счет изменения значения напряжения $\underline{U}_1'$ (в допустимых пределах).

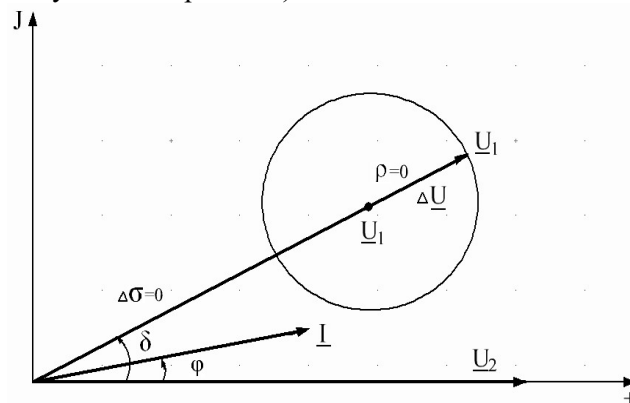


Рис.5 Режим регулятора напряжения.

2. Режим регулирования продольной емкостной компенсации, когда вектор $\underline{\Delta U}$ сдвинут по отношению к току линии на 90° (рис. 6).

Т.к. $\rho = 90^\circ - (\delta - \varphi)$

При $\underline{U}_1 = \underline{U}_2$ будем иметь $\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg}(\delta/2)$ или $\varphi = \delta/2$, отсюда $\rho = 90^\circ - \delta/2$.

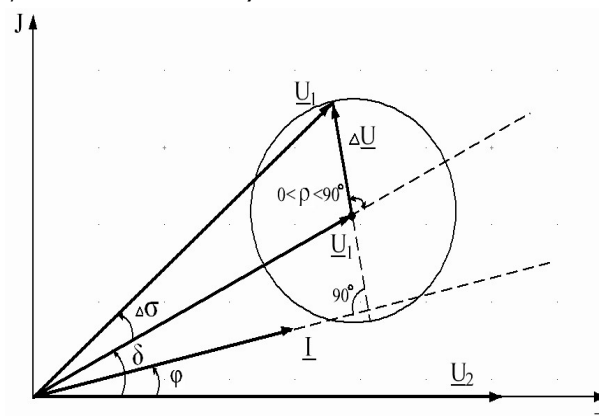


Рис.6 Режим продольной емкостной компенсации.

3. Режим регулируемого фазоворотного устройства, когда вектор $\underline{\Delta U}$ напряжения сдвинут на электрический угол 90° по отношению к напряжению $\underline{U}_1$. В этом случае при постоянном угле ρ , равном 90° , изменение значения $\underline{\Delta U}$ приведет к изменению передаваемой мощности (рис. 7).

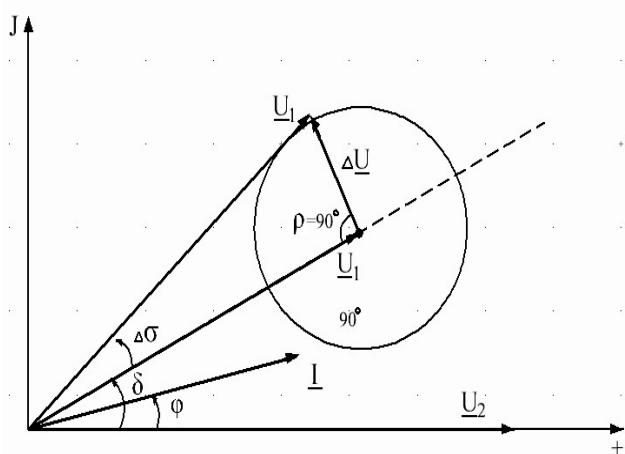


Рис.7 Режим регулируемого фазоповоротного устройства.

Достоинства и недостатки ОРПМ

Достоинства:

- Более глубокое влияние на характеристики режима линии по сравнению с другими средствами регулирования.
- ОРПМ сочетает в себе свойства сразу трех аппаратов: статического компенсатора реактивной мощности, установки продольной компенсации и фазоповоротного устройства.

Недостатки:

- При увеличении диапазона регулирования, необходимо увеличивать мощность регулирующих устройств (прежде всего преобразователь ПН2).
- Напряжение U_1 является функцией угла ρ , поэтому напряжение U_1 может значительно превышать номинальное напряжение или быть существенно ниже его в зависимости от значений ΔU и этого угла, что может привести к возникновению коронирования проводов и потребует усиления изоляции.
- Увеличение длины линии приводит к снижению диапазона изменения активной мощности в процессе регулирования.

Заключение

Используя ОРПМ, можно путем изменения угла ρ , т.е. поворота вектора ΔU в достаточно широких пределах регулировать передаваемую по линии активную мощность. Одновременно

изменять напряжение и реактивную мощность в начале линии.

Устройства ОРПМ могут быть установлены на двух или нескольких системообразующих линиях различных классов напряжения. В этом случае управление перетоками мощностей по этим линиям должно осуществляться единым регулятором, что даст возможность оптимизировать распределение мощностей по этим линиям и повысить надежность работы электроэнергетической системы.

Однако ОРПМ имеет как ряд достоинств, так и недостатков, поэтому вывод о целесообразности применения данного устройства может быть сделан только после проведения ряда расчетов для конкретной линии.

Список литературы

1. Рыжов, Ю.П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учеб. для вузов / Ю.П. Рыжов. – М.: Издат. дом МЭИ, 2007. – 488 с.
2. Егоров И.С. Регулирование напряжения блока «Синхронный регулятор – объединенный регулятор потока мощности» /Егоров И.С., Гольдштейн М.Е.// Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: энергетика. –2017 – Т.4.
3. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергосамиздат, 1989. – 592 с.: ил.

References

1. Ryzhov Yu.P. Dal'nie elektropredachi sverkhvysokogo napryazheniya: uchebnik dlya vuzov [LongDistance Transmission of EHV]. Moscow, Moscow Power Engineering Institute Publ., 2007. 488 p.
2. Egorov I.S. Voltage regulation of unit «Synchronous generator - combined power flow regulator» / Egorov I.S., Goldshteyn M.E.// Bulletin of the South Ural State University. Series: energy. – 2017 - T.4.
3. Idelchik V.I. *Electrical systems and networks / Textbook for universities.* - M .: Energosamizdat, 1989. - 592 p.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 550.837.3

Механизм образования подземных пресных вод в районе Крымского полуострова**А.М. Акимов, Н.И. Ковалев, С.А. Котельникова***ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, e-mail: cvetlana.83@inbox.ru*

Статья поступила 10.09.2019 г.; после доработки 12.09.2019 г.

Аннотация

Рассматриваются итоги исследования механизма формирования подземных питьевых и термальных вод во вторичных очагах потухших вулканов, расположенных вблизи побережья Крымского полуострова. Предлагается активно использовать эти огромные запасы питьевых вод для нужд населения и промышленности Крыма.

Ключевые слова: подземные воды, потоки термальных вод, потухшие вулканы, вторичные магматические очаги.

The mechanism of education of underground fresh water in the area of the Crimean peninsula**A.M. Akimov, N.I. Kovalev, S.A. Kotelnikova***Sevastopol state University, Sevastopol, 299002 Russia e-mail: cvetlana.83@inbox.ru*

Received 10.09.2019 y.; received in final form 12.09.2019 y.

Abstract

The results of the research are considered the mechanism of formation of underground drinking and thermal waters in secondary foci of extinct volcanoes located near the coast of the Crimean peninsula. It is proposed to actively use these huge reserves of drinking water for the needs of the population and industry of the Crimea.

Keywords: underground waters, streams of thermal waters, extinct volcanoes, secondary magmatic foci.

Введение

Известно, что водоотведение в конце XX столетия по сравнению с началом века увеличилось в 12 раз и достигло огромной величины: около 5000 км³/год.

Водохозяйственный потенциал ресурсов пресной воды оценивается в 2.5-2,8 млн. км³/год, а современные доступные эксплуатационные запасы – в 42000 км³/год. Из них лишь 14000 км³/год составляют устойчивую часть речного стока и 2000 км³/год составляют маломинерализованные подземные воды (с солесодержанием менее 1 г/л). Около 70% мирового водопотребления приходится на сельское хозяйство, 13% - на промышлен-

ность и 10% - на коммунально-бытовые нужды.

Постановка задачи

Вопрос водоснабжения республики Крым и города федерального значения Севастополь остро стал после 2014 года, когда был перекрыт северо-крымский канал, обеспечивающий полуостров водой из реки Днепр.

Учеными и специалистами Севастопольского государственного университета (до 2015 года Севастопольский национальный университет ядерной энергии и промышленности) выполнен ряд важных инициативных

проектов по поиску подземных питьевых вод в районе Крымского полуострова.

При исследовании прибрежных территорий Крыма были установлены два источника

формирования подземных пресных вод вблизи магматических очагов, как показано на рис.1

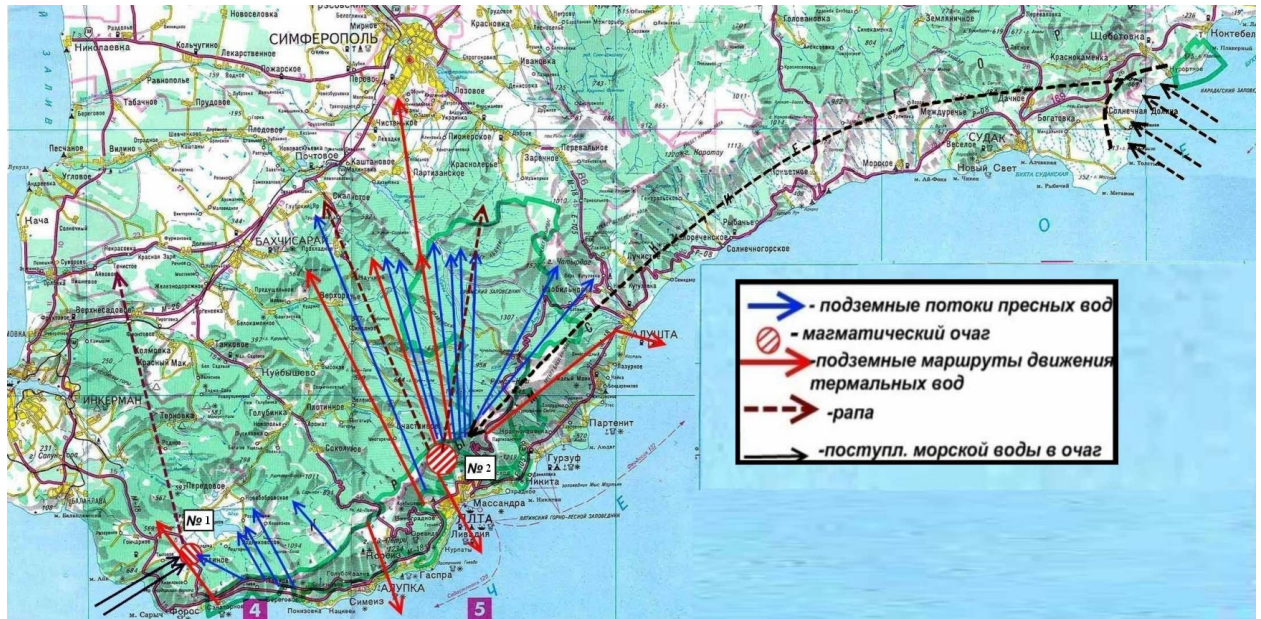


Рис. 1. Карта выявленных очагов в Крыму №1 и №2, в которых осуществляется непрерывное кипение поступающих соленых вод, с образованием конденсата в Ай-Петринской Яйле (г.Ай-Петри) и пути движения подземных пресных геотермальных вод по территории Крыма.

Было определено, что на высокотемпературную часть магматических очагов потухших вулканов поступают значительные потоки воды из Черного моря. Морская вода дренируется по водопроницаемым породам и геологическим разломам с глубин 380-400 м. Ширина потоков морской воды составляет от 7 до 15 км. Длина потоков колеблется от нескольких до сотен километров.

По мере движения потоки соленой воды постепенно углубляются и достигают высокотемпературной части магматических очагов на глубинах 970-1170 м от уровня моря (> 2000 м от поверхности земли). Вода здесь вскипает.

Площади зоны подземного парообразования достигают в диаметре до 4÷8 км и более. Избыточный напор в потоке морской воды достигает ~ 30÷40 кг/см². Пар под избыточным давлением и с температурой в зоне кипения + 100÷200°C поднимается вверх по георазломам (выше уровня моря) на различные глубины, в зависимости от залегания трещиноватых водопроницаемых пород (трещиноватые известняки, карсты, крупнозернистые песчаники и др.), где охлаждается и конденсируется. Примерно на глубинах от поверхности земли 930÷1100 м образуются горячие геотермальные озера прес-

ной воды с $t_{\text{в}}=56\div86^{\circ}\text{C}$. Избыточный напор на этих глубинах достигает 12÷15 кг/см². На глубинах 380÷400 м формируются озера пресной воды с температурой +25÷30°C и незначительным напором. По мере движения потоков подземных пресных вод по георазломам или по трещиноватым породам они охлаждаются до их температуры.

Наличие участка парообразования подтверждено бурением 2-х скважин в Ай-Петринской Яйле (Н = 1000 м, в центре участка и у северной границы). Керны представляли собой породы из трещиноватых известняков с высокой влажностью и температурой более 90°C. Буровые работы выполнены «Крымгеологией» (Рис.1).

Установлено, что конденсация пара, образованного в очагах №1 и №2, происходит в горном районе (в Ай-Петринской Яйле).

Подземные потоки пресных вод Крыма, сформированные в подземных озерах Ай-Петринской Яйлы, расходятся в разные стороны по георазломам. Эти потоки пересекают территорию Крыма (200÷300 км), а затем впадают в Черное и Азовское моря на различных глубинах (от 180 м до 400 м) и удалениях от берега 1÷1,5 км. Выклинки крупных потоков подземных пресных вод в Черном море подтверждены исследованиями

академика НАН Украины Шнюкова Е.Ф. (с помощью глубоководного аппарата «Омар»). Ширина этих потоков при выклинках в море составляла от 100 м до 60÷80 м, а мощности горизонтов потоков достигали от 20 м до 40 м (Рис.1). По отдельным георазломам на больших глубинах (2÷2,5 км) от очагов кипения морской воды фиксируются потоки соленых горячих вод с температурой более 95°C (рапа). Потоки подземных геотермальных пресных вод в Крыму подтверждены в 3 потоках бурением 4 скважин (на глубинах 980÷1100 м), а питьевых вод бурением более 80 скважин.

По пути движения крупных потоков пресных вод происходит их разветвление на более мелкие, чем обеспечивается подземными водами значительные площади. Но если загрязнить техногенными токсичными веществами основной поток, то практически огромная территория может оказаться с загрязненными подземными водами (в Греции из 5-ти потоков пресных вод – три засолены при проведении нефтегазоразведки).

Это требует не только рационального

использования подземных пресных вод крупных потоков, но и разработку международных документов, регламентирующих защиту этих потоков вод высокого качества от техногенных загрязнений, а также от засолений при проведении разведочного бурения на больших глубинах.

Исходя из результатов проведенных экспериментальных работ и теоретических исследований [1] можно обосновать следующий механизм образования подземных пресных вод высокого качества вблизи магматических очагов потухших вулканов за счет испарения морской воды, поступающей к очагу, с последующей конденсацией пара в охлажденных трещиноватых породах. Из образованных озер пресные воды истекают под Землей по георазломам на большие расстояния и выклиниваются снова в моря, океаны или озера. Данные подтверждены бурением скважин и отбором проб.

Принципиальная схема механизма образования подземных пресных вод вблизи магматических очагов вулканов приведены на рис.2.

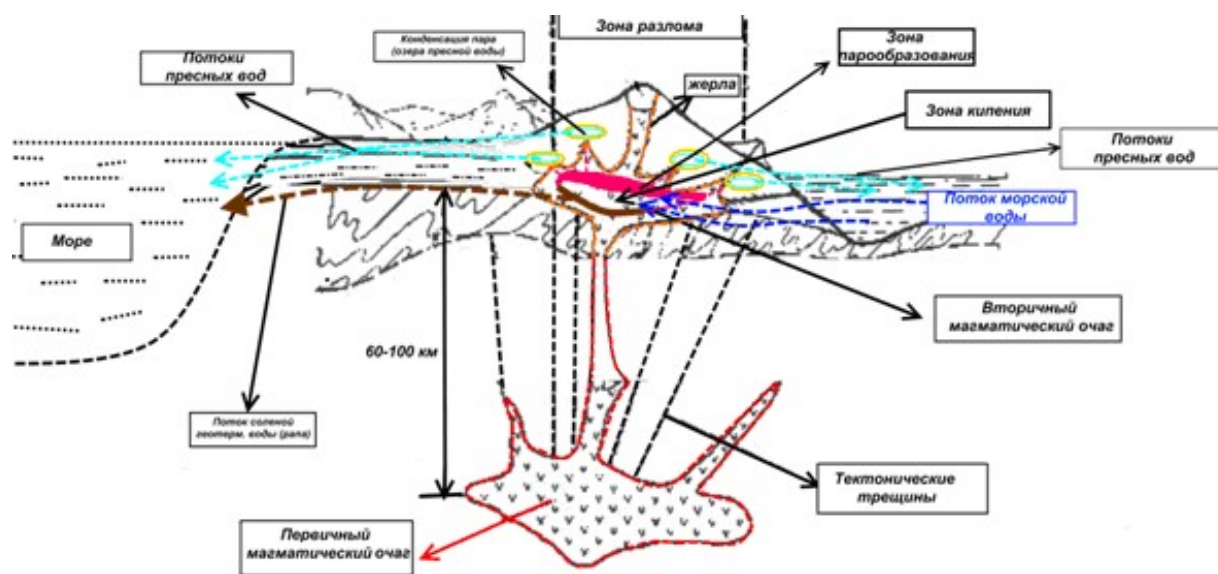


Рис. 2. Принципиальная схема механизма образования подземных пресных вод вблизи магматических очагов вулканов.

Исходя из разведанных запасов геотермальных вод в Крыму имеется возможность построения 2-х тепловых станций с отбором вод с глубины 4000 м.

Исследования последних лет показывают, что геотермальные ресурсы могут использоваться во многих крымских городах – г.Симферополе, г.Ялте, г.Севастополе, г.Инкермане, г.Балаклаве, г.Алупке, г.Алуште, п.Донузлав. Наиболее детально была исследо-

вана территория, охватывающая г.Севастополь, г. Инкерман, г. Балаклаву.

Состав геотермальных вод на глубинах до 1200 м – пресные, слабоминерализованные, пригодные для бутилирования (для питья), с избыточным напором, что обеспечивает из самоизлив. На глубинах более 2000 м геотермальные воды соленые (рапа).

Наличие геотермальных вод питьевого качества объясняется механизмом их образования

вблизи очагов двух потухших вулканов и обеспечивается их возобновление. Использование этих геотермальных вод особенно привлекательно в городах курортных зон, т.к. не будет происходить засоление почв при утечках этих вод из городских канализационных и тепловых систем, обеспечивающих теплоснабжение важных городских объектов, лечебно-профилактических центров, школ, административных зданий и т.д. Значительные возобновляемые ресурсы незасоленных геотермальных подземных вод Крыма позволяют их использование в теплоснабжении и затем передачу отработанных вод для обогрева теплиц, бассейнов и водноспортивных комплексов.

Использование геотермальных вод позволяет сократить значительное количество котельных в городских и хозяйственных учреждениях. За счет этого возможно значительно улучшить экологическую безопасность в городах и существенно снизить финансовые затраты на получение горячей воды в течение всего года.

Расчеты показывают, что окупаемость проекта по использованию геотермальных вод на обеспечение города (до 0,5 млн. человек) горячим водоснабжением и отоплением составляет около 1 года, т.к. не требуется замены существующих городских коммунальных систем. При эксплуатации термальных скважин отсутствуют вредные газовые выбросы. Практически каждая термальная скважина может использоваться для бутилирования питьевых вод без их дополнительного нагрева с целью ее обеззараживания. Температурный режим и химические характеристики геотермальных вод Крыма позволяют использовать их также в системах агропромышленной и курортно-оздоровительной сфере.

В Крыму уже имеются примеры использования геотермальных подземных вод:

1) В п. Медведовка (Джанкойский район) тепловая энергия одной скважины используется для отопления школы и детского сада.

2) Для обеспечения круглогодичного использования геотермальной энергии создан проект технологического комплекса п.Янтарное, в котором геотермальная вода используется для:

- теплоснабжения жилых домов;
- функционирования лечебного и спортивно-оздоровительного центра;
- функционирования тепличного комплекса и комплекса по переработке и хранения продукции (сушка, копчение, консервиро-

вание овощных продуктов; рыбных и мясных).

Обоснован и предложен авторским коллективом Севастопольского государственного университета под руководством к.т.н. Ковалева Н.И. инвестиционный проект по использованию термальных подземных вод для обеспечения горячего водоснабжения, отопления и других хозяйственных нужд г.Севастополя и г.Инкермана.

Заключение

1. Проведенные исследования с помощью геокосмических средств поиска подземных вод и аппаратуры резонансно-тестового дистанционного комплекса «Поиск» [1, 2, 3] позволили установить один из механизмов природного образования подземных питьевых и геотермальных вод вблизи магматических очагов потухших вулканов, расположенных на побережье морей и океанов. Механизм образования этих вод состоит в том, что морская вода по тектоническим трещинам разломам и трещиноватым породам поступает к вторичному магматическому очагу на глубины 2000 м, где она вскипает. Образованный пар под давлением поступает по тектоническим трещинам к более верхним охлажденным водопроницаемым породам (на глубинах 400÷1000 м), конденсируются и образует подземные озера, из которых затем истекают по георазломам потоки пресной воды. Из нижней части зоны парообразования по тектоническим трещинам истекает соленая геотермальная вода на глубинах 2000÷2500 м от поверхности земли.

2. Данные источники образования подземных пресных вод следует внести в общий баланс круговорота воды на планете и отнести к устойчивым, возобновляемым ресурсам пресных вод, которые могут активно использоваться для сельскохозяйственных нужд и в качестве источников питьевого водоснабжения городов.

3. Необходимо использовать потенциалы подземных пресных вод Крыма в интересах обеспечения туристических и лечебно-оздоровительных комплексов и для водообеспечения городов.

Список литературы

1. Ковалев Н.И. Применение дистанционного геофизического комплекса «Поиск». Решение инженерных и геолого-поисковых задач. / Н.И. Ковалев, В.А. Пухлий, С.В. Солдатова. Дюссельдорф: Издат. Palmarium Academic Publishing, 2016 - 170 с.

2. Н.И. Ковалев, А.М. Акимов, И.А. Черкашин и др. «Дистанционное определение контуров развития подземных пресных вод в Шинэ-Усны-Гоби на территории Мондах Сомона Дорногобийского аймака Монголии» отчет НИР «Гоби», СНУЯЭиП, г. Севастополь, 2008 г., с.65.
3. Н.И. Ковалев, А.М. Акимов. Исследование механизма образования подземных пресных вод вблизи магматических очагов потухших вулканов. г. С.Петербург «Экология и развития общества» №3 (14), 2015 г. стр. 24-27

References

1. Kovalev N.I. The use of remote geophysical complex "Search". Solution engineering and exploration tasks./ N.I. Kovalev, V.A. Pychliu, S.V. Soldatova. Dusseldorf: Palmarium Academic Publishing, 2016 - 170 p.
2. N.I. Kovalev, A. M. Akimov, I. A. Cherkashin, etc., "Remote determination of the contours of the development of underground fresh water in China-usni-Gobi in the territory of Mondah Tarnogorodskogo Soums of the aimag of Mongolia" research report "Gobi", SNUNEI, Sevastopol, 2008 - p. 65.
3. N. I. Kovalev, A. M. Akimov. Investigation of the mechanism of formation of underground fresh water near magma chambers of ancient volcanoes. St. Petersburg "Ecology and development" №3 (14), 2015 - pp. 24-27.

УДК.550.837.3

Современные взгляды на механизм переноса вещества через пористые мембраны

А.М. Акимов, С.А. Котельникова

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, e-mail: cvetlana.83@inbox.ru*

Статья поступила 17.09.2019 г.; после доработки 18.09.2019 г.

Аннотация

Рассматриваются современные взгляды на механизм процесса разделения жидких и газовых смесей, играющих важную роль во многих отраслях народного хозяйства.

Ключевые слова: молекулярная диффузия, кнудсеновское течение, мембрана, порозность мембраны, массоперенос.

Modern views on the mechanism of substance transfer through porous membranes

A.M. Akimov, S.A. Kotelnikova

Sevastopol state University, Sevastopol, 299002 Russiae-mail: cvetlana.83@inbox.ru

Received 17.09.2019 y.; received in final form 18.09.2019 y.

Abstract

Modern views on the mechanism of separation of liquid and gas mixtures, which play an important role in many sectors of the economy, are considered.

Keywords: molecular diffusion, Knudsen flow, membrane, membrane porosity, mass transfer.

Введение

Хотя технология разделения сред стала достаточно распространенным методом, механизм транспортировки разделяющих фаз (сред) через мембрану остается постоянным объектом для дискуссий. Из множества предложенных физических и математических моделей процесса, получивших наибольшее признание, выделим три:

1. Наиболее простая и легкая для понимания – модель «сита» или модель молекулярно-ситового разделения.
2. Другой моделью механизма переноса является модель диффузионного переноса (до сих пор разделяемая некоторыми исследователями), в соответствии с которой вода, и растворенные вещества проникают через мембрану за счет диффузии.
3. Третья модель объясняет транспортировку

ионов через мембрану капиллярно-фильтрационной моделью селективной проницаемостью.

Несмотря на большое число других моделей переноса, которые пытаются объединить для количественного описания мембранных процессов, однако основные их характеристики определяются экспериментально.

Постановка задачи

Явления, связанные с полупроницаемыми мембранами проницаемыми для молекул воды (растворителя), но не проницаемыми для растворенных и взвешенных веществ, играют важную роль как в технике, так и в биологии. Они базируются на осмотических процессах, характеризующихся односторонней диффузией раствори-

теля (молекул воды) через полупроницаемую перегородку и возникновением осмотического давления раствора.

Рассмотрим современный взгляд исследователей на явление переноса вещества через пористые мембраны.

При использовании пористых мембран выделяют два механизма «проницания» - с ними связаны механизмы разделения смесей. Перенос вещества в порах мембраны может осуществляться за счет свободного молекулярного течения или за счет вязкого течения.

Наглядно продемонстрировать механизм «проницания» позволяют рисунок 1 и 2.



Рис. 1. Морфология и механизм транспорта в различных слоях асимметричной мембраны.

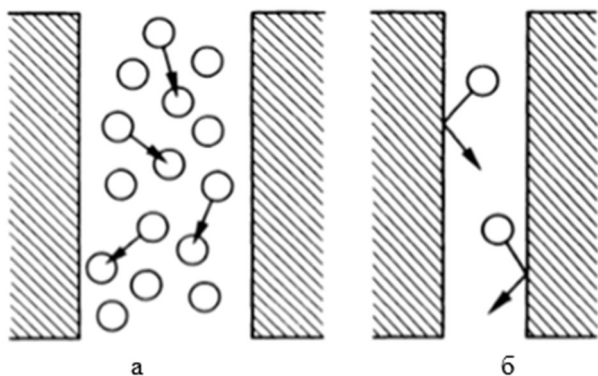


Рис. 2. Вязкостный (а) и кнудсеновский (б) потоки в порах мембраны

Первый механизм реализуется, если диаметр пор мембраны много меньше длины свободного пробега молекул компонента – обычно это наблюдается при радиусе $r < 0,25 \cdot 10^{-6}$ м, т.е. для микропористых мембран [1]. В этом случае вероятность столкновения молекул друг с другом много меньше вероятности их столкновения со стенкой канала (поры) и отражения от нее (под углом, равным в идеале углу падения). Различия в длине свободного пробега молекул (из-за различных молярных масс проникающих компонентов) приводит к разнице в скоростях движения компонентов в пористом теле мембраны и

является причиной отличной от единицы селективности последней. Такое течение называется «свободной молекулярной диффузией», или «кнудсеновским течением».

Математически это явление можно представить следующим образом: пусть компонент молярной массой M движется изотермически в условиях разрежения через тонкий капилляр длиной L и радиусом r_0 под действием разности давлений на его концах ($P_1 - P_2$); его молярный поток $M' = G/M$ составляет [1]:

$$M' = \frac{8 \cdot \pi \cdot r_0^3}{3(2 \cdot \pi \cdot R_y \cdot M \cdot T)^{1/2}} \cdot \frac{P_1 - P_2}{L}, \quad (1)$$

где G – массовый поток компонента;

R_y – универсальная газовая постоянная.

Применительно к изотермическому течению в пористом теле мембраны, пронизанном короткими капиллярами ($2r_0 \approx L$), расчетные выражения для молярного M' и массового G потоков через бесконечно малый элемент площади мембраны dF имеет вид:

$$dM' = \frac{dF}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot R_y \cdot M \cdot T}} \cdot (P_1 - P_2); \quad (2)$$

$$dG = \sqrt{\frac{M}{2 \cdot \pi \cdot R_y \cdot T}} \cdot (P_1 - P_2) \cdot dF = K_p (P_1 - P_2) dF \quad (3)$$

Из уравнения (3) ясно, что движущей силой процесса массопереноса компонента через мембрану является разность парциальных давлений компонента на противоположных сторонах мембраны.

При неизотермическом кнудсеновском течении компонентов через мембрану процесс переноса происходит не только под действием перепада давлений в над и подмембранном пространстве элемента dF , но и в условиях разных температур:

$$dG = \sqrt{\frac{M}{2 \cdot \pi \cdot R_y}} \left(\frac{P_1}{\sqrt{T_1}} - \frac{P_2}{\sqrt{T_2}} \right) dF = K_p \left(\frac{P_1}{\sqrt{T_1}} - \frac{P_2}{\sqrt{T_2}} \right) dF \quad (4)$$

Из уравнений (3,4) видно, что $K_p \sim f(\sqrt{M})$, значит мембрана селективна по отношению к компонентам с разной молярной массой:

$$a_{is} = \frac{K_{pi}}{K_{ps}} = \sqrt{\frac{M_i}{M_s}}. \quad (5)$$

Из уравнений (3,4) следует также, что селективность мембраны при кнудсеновском течении

в ее порах не зависит от способа создания движущей силы процесса и определяется выражением (5).

Второй механизм переноса характерен для макропористых мембран с эквивалентным диаметром пор ($d_3 \geq 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$), существенно превышающим длину свободного пробега молекул. Здесь перенос компонентов через мембраны происходит обычно за счет вязкого течения субстанции через сквозные поры. Массовый поток компонентов через бесконечно малый элемент площади мембраны dF в этом случае можно рассчитать, используя уравнение для ламинарного течения в каналах или в зернистом слое [1].

$$dG = \frac{1}{150} \cdot \frac{\varepsilon_0^3}{(1-\varepsilon_0)^2} \cdot \frac{d^2 P}{\mu \delta} \Delta p dF = K_p \Delta p dF, \quad (6)$$

Где d – диаметр поры;

ε_0 – порозность мембраны;

μ – вязкость проникающей субстанции;

ρ – плотность проникающей субстанции;

δ – толщина мембраны (длина канала).

Из уравнения (6) следует, что для компонентов, движущихся в порах мембраны, селективность равна единице. Отсутствие эффекта разделения в вязком потоке объясняется тем, что здесь эквивалентный диаметр пор много больше длины свободного пробега молекул.

Разделение потока на компоненты при использовании таких мембран будет происходить лишь тогда, когда один компонент проникает через поры мембраны, а другой «застревает» в них. Селективность мембраны в этом случае ($K_{ps} \rightarrow 0$) равна бесконечности.

Выводы

На основе математического аппарата объясняющего явление массопереноса в химической технологии рассмотрены два механизма разделения смесей при использовании пористых мембран.

Первый механизм реализуется, если диаметр пор мембраны много меньше длины свободного пробега молекулы компонента – это наблюдается при радиусе $r < 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, то есть для микропористых мембран.

Второй механизм характерен для макропористых мембран с эквивалентным диаметром пор ($d_3 \geq 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$), существенно превышающих

длину свободного пробега молекул.

Список литературы

1. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс. Под редакцией В.Г. Айнштейна. – М.: Бином. Лаборатория знаний. 2014 – 1784с.
2. Котлов А.С. Очков В.Ф., Чуданова Ю.В. процессы и аппараты передовых технологий водоподготовки и их программированные расчеты: учебное пособие для ВУЗов. М.: Издательский дом МЭИ, 2016г. -220с.
3. Акимов А.М., Котельникова С.А. Теоретические основы баромембранных методов обработки воды Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность 2018», Севастополь 24-27 сентября 2018г.

References

1. Processes and apparatus of chemical technology. General course. Edited by V. G. Einstein. - M.: Binom. Laboratory of knowledge., 2014 – 1784 p.
2. Boilers A. S., Ochkov V. F., Chudinova J. V. processes and devices of advanced water treatment technologies and their programming-bathrooms calculations: textbook for HEI. M.: publishing house MEI, 2016. – 220 p.
3. Akimov A. M., Kotelnikova S. A. Theoretical bases of baromembrane methods of water treatment international scientific and practical conference "Ecological, industrial and energy safety 2018", Sevastopol 24-27 September 2018.

УДК 631.029

Анализ оптимальных концентраций радиационно-защитных материалов

Н.И. Черкашина¹

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. ¹selyanskij-as@ya.ru, ²oleksandra.litvinova@mail.ru

Статья поступила 19.09.2019 г.; после доработки 23.09.2019 г.

Аннотация

Предложен анализ себестоимости и коэффициента ослабления защитных композитных материалов на основе поливинилацетатного клея. Определен оптимальный модификатор композитного материала, который улучшает радиационно-защитные свойства и имеет меньшую себестоимость. Исследована ослабляющая способности композиционных материалов с различными наполнителями и произведен экономический расчет полученных материалов.

Ключевые слова: нанопорошок, композиционные материалы, кратность ослабления, карбид вольфрама карбид титана, экономический расчет.

Analysis of optimal concentrations of radiation protective materials

N.I. Cherkashina¹

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, 299053, Russia
¹selyanskij-as@ya.ru, ²oleksandra.litvinova@mail.ru

Received 19.09.2019 y.; received in final form 10.10.2019 y.

Abstract

An analysis of the cost and attenuation coefficient of protective composite materials based on polyvinyl acetate adhesive is proposed. The optimal modifier of the composite material has been determined, which improves radiation protective properties and has a lower cost. The weakening ability of composite materials with various fillers was investigated, and the economic calculation of the resulting materials.

Keywords: nanopowder, composite materials, attenuation ratio, tungsten carbide titanium carbide, economic calculation.

Введение

Важным и перспективным в настоящее время является использование наноматериалов в качестве компонентов композитов самого разного назначения.

Добавление нанопорошков (подшихтовка) к обычным порошкам при производстве сталей и сплавов методами порошковой металлургии позволяет снижать пористость изделий, улучшать комплекс механических свойств [1].

Проявление эффекта сверхпластичности в наноструктурных сплавах алюминия и титана делает перспективным их применение для изго-

товления деталей и изделий сложной формы и для использования в качестве соединительных слоев для сварки различных материалов в твердом состоянии [1].

Очень большая удельная поверхность нанопорошков (порядка $5 \times 10^7 \text{ м}^{-2}$) способствует их применению в ряде химических производств в качестве катализаторов [1].

Производство чистых нанопорошков тяжелых металлов (типа вольфрама, карбида ванадия, карбида вольфрама, карбида титана, карбида ниобия и др.), их оксидов и карбидов осуществляется внедрением уникальной техноло-

гии получения нанопорошков заданных по характеристикам и низким по стоимости путем микробиологической переработки сырья.

В качестве сырья могут использоваться отработанные твердосплавные изделия (отработанные буры, резцы, бронебойные сердечники и т.д.), что также позволяет снизить себестоимость порошков.

К основным положениям Рекомендаций Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ) от 2007 года [2] относится использование принципов обоснования и оптимизации защиты от всех контролируемых ситуаций облучения, которые характеризуются как ситуации планируемого облучения, аварийные и существующего облучения.

В публикации подчеркивается усиление принципа оптимизации радиационной защиты, который должен равно применяться ко всем ситуациям облучения при условии ограничений индивидуальных доз и радиационных рисков, а именно: введение граничных доз и рисков для ситуаций планируемого облучения и референтных уровней для ситуаций аварийного и существующего облучения [3].

Для эффективной защиты от γ - излучения используются материалы с большим атомным номером и высокой плотностью, например: свинец, бетон, сталь и другие материалы.

Из этих материалов наилучшей интенсивностью поглощения γ - лучей обладает свинец, применение которого, в качестве защиты против воздействия γ - излучения ограничивается его низкой температурой плавления (327 градусов), поэтому в горячих зонах используют такие металлы, как: вольфрам (атомный номер $Z=74$; плотность $\rho=19,3$ г/см³), тантал (атомный номер $Z=73$; плотность $\rho=16,6$ г/см³) [4], титан (атомный номер $Z=22$; плотность $\rho=4,54$ г/см³) и др. Высокий атомный номер и большой удельный вес делают возможным использование материалов для создания малогабаритной защиты.

Важным средством обеспечения индивидуальной радиационной безопасности сотрудников, работающих в зоне действия источников излучения или радиоактивного загрязнения является защитная одежда, которая в зависимости от области применения должна обеспечивать высокий уровень биологической защиты персонала. на сегодняшний день многие современные материалы, используемые для защитных костюмов представляют собой высоконаполненные композиционные материалы на основе полимера (резины, каучук, пластика и др.) со специальным наполнителем

из соединений поглотителя. в качестве таких наполнителей используют такие металлы как свинец, барий, кадмий, молибден, вольфрам, их карбиды [5], лантаноиды, и различные другие соединения.

Следует отметить, что на коммерческом рынке в настоящее время наиболее широко представлены такие наноматериалы, как нанопорошки металлов и сплавов, нанопорошки оксидов (кремния, железа, сурьмы, алюминия, титана), нанопорошки ряда карбидов, углеродные нановолокна, фуллереновые материалы.

На первом этапе предполагается использование различных рецептур и определение оптимальной доли нанодобавок в композитных материалах, проведение натурных экспериментов по определению получаемых радиационно-защитных эффектов, детальное исследование структур и описание наблюдаемых эффектов.

Данный подход имеет существенные ограничения, связанные с высокой стоимостью нанопорошков или отсутствием технологий позволяющей получать массовые объемы порошков.

Существующие наиболее распространенные способы синтеза нанопорошков, относятся к технологиям, для которых характерно применение дорогостоящего и энергоемкого оборудования, повышенных давлений и температур, а также токсичных реактивов с многостадийной химической очисткой, что приводит к значительному увеличению стоимости нанотехнологической продукции и препятствует ее широко-масштабному внедрению в строительную отрасль.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является определить оптимальное соотношение цены и качества исследуемого материала.

Для решения поставленной задачи, объектом исследования выбраны защитные композитные материалы с процентной концентрацией 1 – 10 %; 2 – 15 % ; 3 – 20 % ; 4 – 25 % ; 5 – 30 %].

Методика эксперимента

Для получения экспериментальных и эмпирических данных исследованы композитные материалы с различным содержанием наполнителя (масс. %): 1 – 10 %; 2 – 15 % ; 3 – 20 % ; 4 – 25 % ; 5 – 30 %. Общий вид полученных образцов представлен на рис. 1.



Рис.1. Фото экспериментальных образцов защитных композитных материалов на основе поливинилацетатного клея.

Методика испытаний зависимости ослабления излучения от концентрации модификаторов использовалась аналогичная в [6-8].

Кратность ослабления оценивалась как отношение мощности экспозиционной дозы на поверхности защиты (испытуемого образца) к мощности экспозиционной дозы после защиты [9].

В данной работе предложен анализ себестоимости и коэффициента ослабления защитных композитных материалов на основе поливинилацетатного клея ГОСТ 30535-97 (затвердитель).

В качестве модификаторов (наполнителей) – порошки полученные из отходов тугоплавких изделий: WC, ТТК, корунд, ТТК(отож) с содержанием наполнителя (масс. %): 1 – 10 %; 2 – 15 % ; 3 – 20 % ; 4 – 25 % ; 5 -30 % . Методика изготовления и физико-химический анализ представлены в [10-11].

Экономический расчет стоимости изготовления образцов

Расчет стоимости изделия (см. формулу 1):

$$C_{\text{изд}\%} = C_{\text{св}} + C_{\text{п}} + C_{\text{рас}} + C_{\text{раб}} \quad (1)$$

где $C_{\text{изд}\%}$ - стоимость изделия, руб/100г;

$C_{\text{св}}$ – стоимость связующего материала, руб/кг;

$C_{\text{п}}$ – стоимость порошка, руб/кг;

$C_{\text{рас}}$ – стоимость растворителя, руб/л;

$C_{\text{раб}}$ – стоимость работы затраченной на изготовление подложки, руб.

Расчет стоимости связующего материала (см. формулу 2):

$$C_{\text{св}} = m_{\text{св}} \cdot \Pi_{\text{св}} \quad (2)$$

где $m_{\text{св}}$ – масса связующего вещества, кг;

$\Pi_{\text{св}}$ – цена связующего вещества, кг.

Расчет стоимости порошка (см. формулу 3):

$$C_{\text{п}} = m_{\text{п}} \cdot \Pi_{\text{п}} \quad (3)$$

где $m_{\text{п}}$ – масса порошка, кг;

$\Pi_{\text{п}}$ – цена порошка, руб/кг.

Расчет стоимости растворителя (см. формулу 4):

$$C_{\text{раств}} = \rho_{\text{раств}} \cdot \Pi_{\text{раств}} \cdot V_{\text{раств}} \quad (4)$$

где $\rho_{\text{раств}}$ – плотность растворителя, г/мл;

$C_{\text{раств}}$ – цена растворителя за 1 л, руб;

$V_{\text{раств}}$ – объем растворителя, мл.

Расчет стоимости работы затраченной на изготовление подложки (см. формулу 5):

$$C_{\text{раб}} = n_{\text{час}} \cdot \Pi_{\text{раб}} \quad (5)$$

где $n_{\text{час}}$ – количество времени затраченного на изготовление образца, час;

$\Pi_{\text{раб}}$ – стоимость работы, руб/час.

Так как объем растворителя и время работы во всех случаях одинаковы (см. формулу 6).

$$\Sigma_{\text{рас+раб}} = C_{\text{рас}} + C_{\text{раб}} \quad (6)$$

где $\Sigma_{\text{рас+раб}}$ – суммарная стоимость растворителя и работы.

$$\text{Отсюда: } C_{\text{изд}\%} = \Pi_{\text{св}} \cdot m_{\text{св}} + \Pi_{\text{п}} \cdot m_{\text{п}} + 26,96.$$

Экономический расчет стоимости изготовления образцов на примере образцов (WC) (1 м²)

$$S = \pi r^2 \quad (7)$$

где S – площадь окружности, см²;

π - число $\pi = 3,14$;

r – радиус подложки

$$S = 3,14 \cdot 4,5^2 = 63,58 \text{ см}^2$$

Отсюда по пропорции рассчитываем массу 1 м² подложки.

$$63,58 \text{ см}^2 \text{ — } 16 \text{ г}$$

$$10000 \text{ см}^2 \text{ — } X \text{ г}$$

$$X = \frac{10000 \cdot 16}{63,58} = 2516,54 \text{ г}$$

$$C_{\text{м}^2} = \frac{2516,54 \cdot \Pi_{\text{изд}\%}}{100}$$

Расчет стоимости изготовления на примере образцов (WC).

$$C_{\text{изд}10\%} = 0,09 \cdot 650 + 0,01 \cdot 3196 + 26,96 = 117,42 \text{ руб}/100\text{г}$$

$$C_{\text{изд}15\%} = 0,085 \cdot 650 + 0,015 \cdot 3196 + 26,96 = 130,5 \text{ руб}/100\text{г}$$

$$C_{\text{изд}20\%} = 0,08 \cdot 650 + 0,02 \cdot 3196 + 26,96 = 143,28 \text{ руб}/100\text{г}$$

$$C_{\text{изд}25\%} = 0,075 \cdot 650 + 0,025 \cdot 3196 + 26,96 = 155,96 \text{ руб}/100\text{г}$$

$$+26,96 = 155,96 \text{ руб}/100\text{г}$$

$$C_{\text{изд}30\%} = 0,07 \cdot 650 + 0,03 \cdot 3196 + 26,96 = 168,69 \text{ руб}/100\text{г}$$

$$\sum_{C_{\text{изд}}}^{\text{WC}} = 117,42 + 130,5 + 143,28 + 155,96 + 168,69 = 715,85 \text{ руб}$$

Для наглядности на рис. 2 представлены данные зависимости эффективности ослабления излучения от себестоимости материала, которая в свою очередь зависит от его толщины.

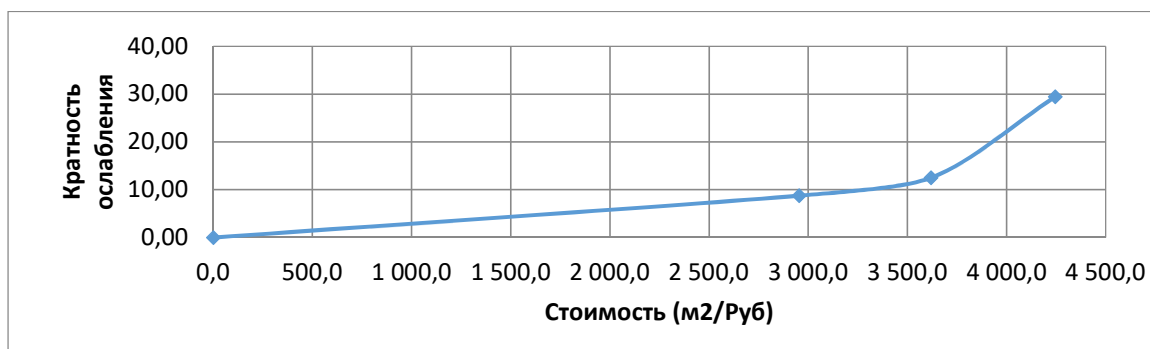


Рис. 2. Зависимость кратности ослабления от стоимости композита (WC)

Из рисунка 2 видно, что кратность ослабления равномерно растет с увеличением толщины материала. Максимальная величина ослабления излучения равна 30, на участке роста стоимости 1 м² с 3,5 тысяч рублей за 1 м² до 4,5 тысяч рублей наблюдается резкий скачок зависимости данных величин. Как показали исследования, дальнейшее увеличение толщины материала не

приводит к положительным результатам и не целесообразно. Эффективная стоимость находится на участке от 3,5 до 4,5 тысяч рублей за 1 м².

Т.к. себестоимость продукта зависит от процентного содержания композита и его состава, то необходимо сравнить материала с одинаковым содержанием наполнителя рис. 3.

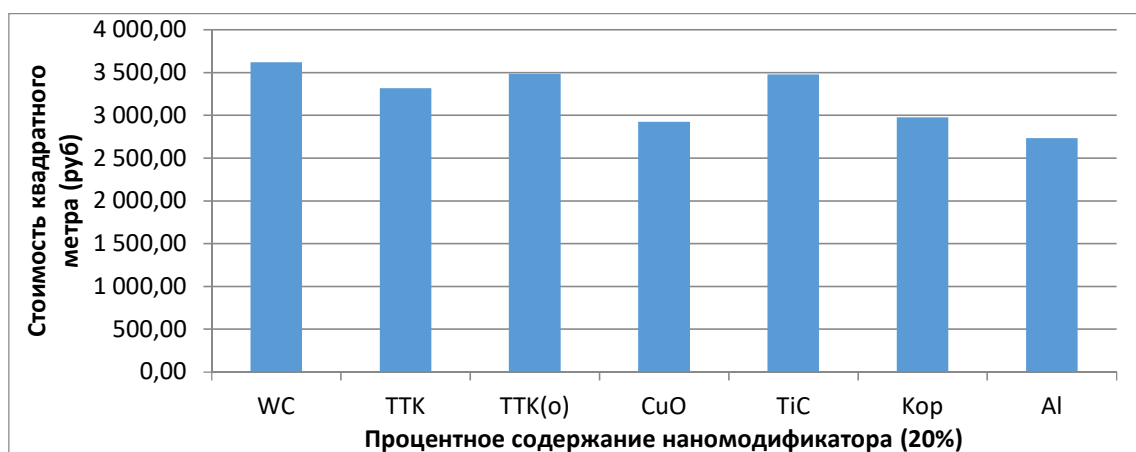


Рис. 3. Зависимость кратности ослабления от стоимости композита (WC)

На рисунке показано, что все материалы с процентным содержанием 20% будут стоить не менее 2,75 тысяч рублей за 1 м², сравнительно

дешевыми из них будут составляющие композита из алюминия и оксида меди. Для более полной картины необходим совместный анализ

себестоимости и радиационно-защитных свойств композитных материалов.

Результаты исследования радиационно-защитных свойств композитных материалов модифицированных порошками легкоплавких металлов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Зависимость коэффициента ослабления от % концентрации добавки модифицированных порошков тугоплавких металлов с привязкой к стоимости

Металл	Содержание (%)	Зуст(12э) Коэффициент ослабление	Стоимость (м ² /руб)
WC	10	8,76	2954,41
	15	9,15	3284,08
	20	11,51	3618,78
	25	15,98	3924,79
	30	29,46	4245,15
ТТК	10	12,44	2815
	15	9,94	3065,4

	20	12,32	3315,79
	25	14,74	3566,18
	30	22,09	3816,58
	30	22,09	3816,58
ТТК (отож)	10	13,06	2899,05
	15	12,08	3190,79
	20	20,05	3483,89
	25	18,96	3675,65
	30	29,86	4068,74
	30	29,86	4068,74
Корунд	10	15,91	2646,79
	15	16,52	2812,46
	20	18,04	2976,06
	25	21,17	3144,66
	30	24,64	3310,76
	30	24,64	3310,76

Наиболее эффективными материалами являются корунд, ТТК, ТТК отождённый, поэтому для определения оптимальной себестоимости для заданной кратности ослабления необходимо воспользоваться рис.4.

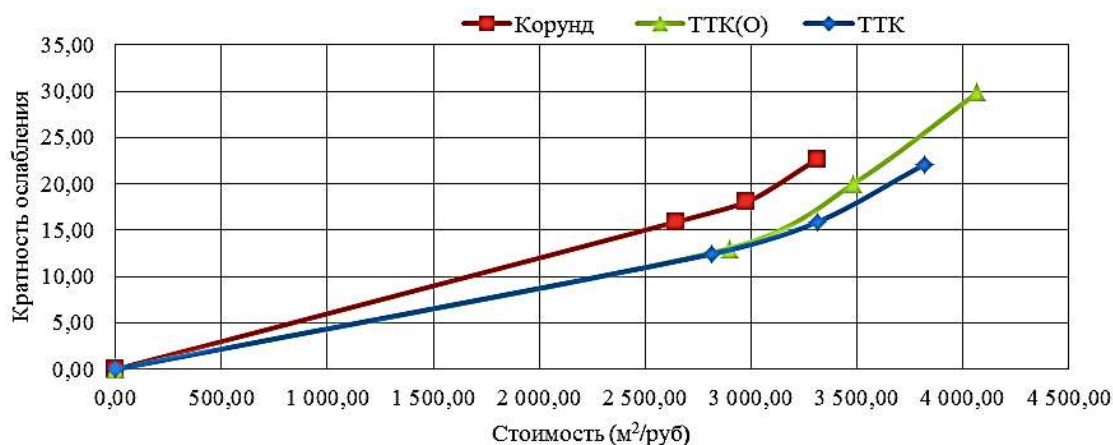


Рис.4. Зависимость стоимости радиационно-защитного материала от кратности ослабления

Наиболее оптимальным модификатором композитного материала, улучшающий радиационно-защитные свойства и имеющим меньшую себестоимость является нанопорошок корунд, при добавлении которого наблюдаются наилучшие результаты: при добавлении 20 % нанопорошка наблюдается увеличение радиационно-защитных характеристик в 23,3 раза.

Выводы

Проведен сравнительный анализ субмикронных порошков, полученных в результате рециклинга твердосплавных отходов типа ТТК (карбид вольфрама WC - карбид титана TiC) с различной концентрацией соединений титана, тантала и вольфрама.

Таким образом, в результате исследования влияния наномодификаторов на радиационно-защитные свойства образцов, можно сделать следующие выводы:

- наиболее оптимальным модификатором композитного материала, улучшающий радиационно-защитные свойства и имеющим меньшую себестоимость является нанопорошок корунд, при добавлении которого наблюдаются наилучшие результаты: при добавлении 20 % нанопорошка наблюдается увеличение радиационно-защитных характеристик в 23,3 раза.
- нанопорошок карбида вольфрама показал наименьшую радиационно-защитную способность по сравнению с другими тугоплавкими образцами;

- исследована ослабляющая способности композиционных материалов с различными наполнителями а произведен экономический расчет полученных материалов.

Список литературы

1. Yoo, D.H., Lee, J., Min, C.H. Effective Dose Calculation Program (EDCP) for the usage of NORM-added consumer product. *Applied Radiation and Isotopes* 139, 2018. – с. 1-6.
2. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. Под общей ред. Киселёва М.Ф., Шандалы Н.К. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 36 с.
3. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Хомяков А.П. Расчетно-экспериментальное исследование однородных защит от гамма-излучения радиационная безопасность, 2015, № 3 (77), с. 1–7.
4. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Хомяков А.П., Русских И.М., Селезнев Е.Н. Расчетно-экспериментальное исследование однородных защит от гамма-излучения // *Ядерная и радиационная безопасность*. №3. 2015. – С.17-24.
5. Серия докладов по безопасности, № 21. Оптимизация радиационной защиты при контроле облучения персонала. Международное агентство по атомной энергии, Вена, 2003. 65 с.
6. Гавриш В.М. Диспергация микронных порошков тяжелых металлов для получения нанопорошков / В.М. Гавриш, Ю.Е. Богатыренко, Н.М. Дербасова // *Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности сборник статей по материалам научно-практической конференции*. ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». –2016. –С. 155-159.
7. Гавриш В.М. Анализ влияния наномодификатора порошка вольфрама на высокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4122 и клей эпоксидный ТУ 2252-003-62517430-01 / В.М. Гавриш, А.А. Бурьянская, Г.А. Баранов, О.П. Гавриш // *Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности сборник статей по материалам научно-практической конференции*. ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». –2016. –С. 189–194.
8. Федорова С.А., Стрюк А.Е. Использование нанопорошка оксида кремния для снижения активности технологических сред // *Сб. ст. науч.-тех. конф. «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности»*. (г. Севастополь 15-18 июня 2016г.) – Севастополь – 2016. – С.66-70.
9. Cherkashina N, Vladimir G., Tatyana C. Experiment – calculated investigation of composite materials for protection against radiation // *Materials Today: Proceedings* 11. –2019. – p. 554–560.
10. Федорова С.А., Магдыч Е.А., Вовк Е.П. Ис-

пользование нанопорошка диоксида кремния при дезактивации модельных растворов // «Экология и развитие общества»: МАНЭБ – Сосновый Бор – №2(17), 2016 – С.45-48.

11. Федорова С.А., Магдыч Е.А., Кухта Ю.А. Исследование изменения β -активности модельных растворов при использовании нанопорошка диоксида кремния в присутствии катионов Na^+ , Mg^{2+} и Fe^{3+} //Сб. «Энергетические установки и технологии». Т. 3. №4. –2017. – С. 98–111.

References

1. Yoo, D.H., Lee, J., Min, C.H. Effective Dose Calculation Program (EDCP) for the usage of NORM-added consumer product. *Applied Radiation and Isotopes* 139, 2018. – P. 1-6.
2. Publication 103 of the International Commission on Radiation Protection (ICRP). Per from English. Under the general ed. Kiseleva M.F., Shandaly N.K. M.: Publishing House LLC PKF "Alana".- 2009. – 36 p.
3. Tashlykov O.L., Scheklein S.E., Khomyakov A.P. Settlement and experimental study of homogeneous gamma radiation protection and radiation safety , 2015, № 3 (77), P. 1–7.
4. Tashlykov O.L., Scheklein S.E., Khomyakov A.P., Russian I.M., Seleznev E.N. Design and experimental study of homogeneous protection against gamma radiation // *Nuclear and Radiation Safety*. - №3. 2015. – P.17-24.
5. Series of Safety Reports, No. 21. Optimization of Radiation Protection in Personnel Exposure Control. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2003. 65 p.
6. Gavrish V.M. Dispersion of micron powders of heavy metals to obtain nanopowders / V.M. Gavrish, Yu.E. Bogatyrenko, N.M. Dербасова // *Actual issues of nuclear chemical technologies and environmental safety collection of articles on the materials of the scientific and practical conference*. Sevastopol State University. –2016. – P. 155-159.
7. Gavrish V.M. Analysis of the effect of nanomodifier of tungsten powder on high molecular weight polyethylene of the brand GUR 4122 and epoxy adhesive TC 2252-003-62517430-01 / V.M. Gavrish, A.A. Buryanskaya, G.A. Baranov, O.P. Gavrish // *Actual issues of nuclear chemical technologies and environmental safety collection of articles on the materials of the scientific and practical conference*. Sevastopol State University. –2016. – P. 189–194.
8. Fedorova S.A., Stryuk A.E. The use of silicon oxide nanopowder to reduce the activity of technological environments // *Sat. Art. scientific conf. "Actual issues of nuclear chemical technology and environmental safety."* (Sevastopol June 15-18, 2016) – Sevastopol – 2016. – С.66-70.
9. Cherkashina N, Vladimir G., Tatyana C. Experiment – calculated investigation of composite mate-

- rials for protection against radiation // Materials Today: Proceedings 11. –2019. – p. 554–560.
10. Fedorova S.A., Magdych E.A., Vovk E.P. The use of silicon dioxide nanopowder in the decontamination of model solutions // Ecology and Society Development: International Agency for National Environmental Safety - Sosnovy Bor – №2(17), 2016 – P.45-48.
 11. Fedorova S.A., Magdych E.A., Kukhta Yu.A. Investigation of changes in the β -activity of model solutions when using silicon dioxide nanopowder in the presence of Na⁺, Mg²⁺ and Fe³⁺ cations // Sat. "Power plants and technologies." Tom 3. №4. –2017. – P. 98–111.

УДК 630.867:661.183.2

Исследование адсорбционных характеристик сорбентов на основе рисовой шелухи при извлечении свинца в одиночных и двоичных системах

Н.И. Черкашина¹

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. ¹selyanskij-as@ya.ru, ²oleksandra.litvinova@mail.ru

Статья поступила 04.09.2019 г.; после доработки 06.09.2019 г.

Аннотация

Определены сорбционные характеристики: коэффициент очистки, коэффициент распределения, степень извлечения ионов свинца из раствора. Проведен сравнительный анализ степени извлечения свинца в присутствии конкурирующих ионов. Изучена конкурентная сорбция в мульти-металлических системах в присутствии тяжелых металлов Fe (III), Zn (II), Ni (II), Cu (II) и Co (II).

Ключевые слова: фильтрация, граничные условия, ионообменные материалы, сорбция, обменная емкость, насыпная масса сорбента.

Research of adsorptive characteristics of sorbents on the basis the rice peel at extraction of lead in single and binary systems

N.I. Cherkashina¹

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia
¹selyanskij-as@ya.ru

Received 04.09.2019 y.; received in final form 06.09.2019 y.

Abstract

Sorption characteristics are defined: cleaning coefficient, distribution coefficient, extent of extraction of ions of lead from solution. The comparative analysis of extent of extraction of lead in the presence of the competing ions is carried out. Competitive sorption in multi metal systems in the presence of heavy metals Fe (III), Zn (II), Ni (II), Cu (II) and Co (II) is studied.

Keywords: filtering, boundary conditions, ion exchange materials, dynamic exchange capacity, sorption, system, bulk weight of the sorbent.

Введение

Загрязнение водных ресурсов тяжелыми металлами вызывает глобальную обеспокоенность в последние десятилетия.

Хорошо известно, что некоторые металлы могут быть токсичными или вредными и влияют на многие формы жизни. Среди наиболее токсичных – Cu, Pb, Zn и Hg, которые являются одними из опасных в списке загрязняющих ве-

ществ, содержащихся в директиве по воде (Директива 2000/60 / ЕС).

Свинец (Pb II) оказывает негативное влияние на живые организмы, а именно угнетает многие ферментативные процессы в организме, нарушается кровообращение, терморегуляция и иммунобиологические свойства.

Способен проникать в организм не только через пищеварительный тракт или легкие, но и через кожу. ПДК свинца в питьевой воде по

международной норме составляет 0,1 мг/л, а в питьевых минеральных водах – 0,3 мг/л.

По объему промышленного производства свинец стоит на четвертом месте в группе цветных металлов.

Целью данной работы является исследование адсорбционных характеристик органических сорбентов на основе рисовой шелухой при извлечении свинца в присутствии конкурентных ионов Fe (III), Zn (II), Ni (II), Cu (II) и Co (II).

Существует несколько способов удаления тяжелых металлов из сточных вод (коагуляция, химическое осаждение, упаривание, электролиз, адсорбция и обратный осмос).

Однако многие традиционные технологии могут быть сложными, дорогостоящими или вредными для окружающей среды и обычно вызывают вторичные проблемы.

Поэтому среди этих процессов, адсорбция, вероятно, является наиболее привлекательной, поскольку она является простым, а также конкурентоспособным и эффективным способом [1-3]. Тем не менее, стоимость сорбента и его регенерация могут быть ограничивающим фактором.

Наряду с промышленными сорбентами, используемых для очистки водных сред сорбенты на основе лигнина обладают рядом преимуществ: лигнинсодержащее сырье является достаточно дешевым крупнотоннажным производством; приемлемые физико-химические свойства (ионообменная и сорбционная емкость, универсальность по отношению очистки от вредных примесей); низкая стоимость и не сложные технологии утилизации [4-6].

Недостатком полученных материалов является ограниченность сырьевых источников и сезонность их образования и накопления.

Для обеспечения необходимых объемов промышленных поставок фильтрующих материалов предлагается расширение материалов сырья: пентозан и лигнинсодержащие компоненты [7-9].

К ним относятся отходы после механической обработки древесины (древесная мука); стержни кукурузных початков (кукурузная кочерыжка); хлопковая шелуха; подсолнечная, рисовая, овсяная лузга; пшеничные и ржаные отруби; мякина; солома пшеницы и других злаков.

Для решения поставленной задачи, объектом исследования выбраны обработанные механохимическими методами подсолнечная, рисовая лузга и солома пшеницы, взятая в соотно-

шении 1:1:1 по массе, технология обработки механохимическим методом вариант opt [13].

Порядок и параметры эксперимента

Приготовление модельного раствора свинца. Приготовление раствора: 1,342 г хлорида свинца $PbCl_2$ ($M = 278,10$; $Pb - 74,50\%$), растворяют в 500 мл разбавленной 1:1 соляной кислоты, после чего разбавляют в мерной колбе дистиллированной водой до 1 л. 1 мг Pb содержится в 1 мл раствора. При приготовлении стандартного раствора необходимо перекристаллизовывать кристаллы из кипящей воды и высушить при $105^\circ C$.

Устранение мешающих ионов.

Определение отдельно ионов свинца в двоичных системах осложнено одновременным нахождением конкурирующих ионов. Например, определению меди мешают катионы железа, для анализа такой смеси необходимо произвести разделение этих катионов. Для этой цели берут 5 мл пробы, приливают 20 мл 1 Н. раствора хлористого аммония. Содержимое стакана нагревают и к горячему раствору приливают 25 – 50 мл 2 Н. раствора гидроокиси аммония (контроль полноты осаждения железа определяется по образованию интенсивно темно-синего цвета $pH - 9$). Мешающее влияние свинца устраняется осаждением его в виде гидроксида.

Происходит выпадения железа в осадок при этом выпадает в осадок в виде гидроокиси, а гидроокись меди растворяется с образованием синего аммиачного комплекса меди. Нагревание раствора необходимо для лучшей коагуляции осадка гидроокиси железа. Осадок отфильтровывают через воронку Бюхнера с двумя плотными фильтрами и промывают горячей дистиллированной водой. На фильтре остается двух- и трехвалентное железо, а двухвалентная медь переходит в фильтрат.

Выполнение работы методом градуировочного графика.

В области 450 – 600 нм через каждые 10 – 20 нм необходимо произвести измерение оптической плотности стандартного самого интенсивно окрашенного раствора в кюветах с толщиной поглощающего слоя 20 мм относительно раствора сравнения в качестве которого выступает дистиллированная вода.

Наибольшая оптическая плотность наблюдалась при длине волны равной 580 нм. Далее проводится измерение оптической плотности стандартных растворов в тех же кюветах при найденной длине волны. Каждое измерение по-

вторяется до трёх воспроизводимых результатов.

Анализируемые растворы готовят с добавлением тех же реагентов. Измерение их оптической плотности проводится при аналогичных условиях.

Спектрофотометрическое определение свинца в присутствии никеля и кобальта проходит с добавлением ацетона при длине волны равной 485 нм.

По трем результатам оптической плотности стандартных растворов рассчитывается среднее значение и строится градуировочный график, далее по значению оптической плотности исследуемого раствора с помощью графика определяют соответствующее значение концентрации.

Методика определения концентрации свинца после сорбции. Реактивы и оборудование для проведения анализа:

- фотоэлектроколориметр любой марки;
- анализируемый раствор свинца;
- ацетатный буфер с рН 4,5;
- азотная кислота с концентрацией (1:2);
- индикатор ксиленовый оранжевый;
- мерные химические колбы на 100 мл;
- бюретки на 25 мл;
- универсальная индикаторная бумага для контроля рН.

Для определения количества свинца в растворе необходимо построение градуировочного графика.

В мерные колбы на 50 мл вносится 5, 10, 12, 15, 18, 20 мл стандартного раствора нитрата свинца, с концентрацией, которая составляет 10 мкг/мл. В каждую колбу добавляется 5 мл раствора ацетатного буферного с рН 4,5 и 5 мл раствора индикатора ксиленолового оранжевого.

Спустя 15 минут производят измерение оптической плотности рабочих растворов на фотоэлектроколориметре приготовленных растворов с длиной волны 580 нм в кюветах с толщиной поглощающего слоя равного 3 мм.

Таблица 1. Результаты определения оптической плотности стандартных растворов

№ раствора	Масса свинца в растворе, мг	Оптическая плотность
1	0,05	0,025
2	0,1	0,05
3	0,12	0,06
4	0,15	0,075
5	0,18	0,09
6	0,2	0,1

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные данные для оценки оптимальных параметров по методу наименьших квадратов

№ раствора	m_i	m_i^2	$A_{i\text{эксп}}$	$m_i \cdot A_{i\text{эксп}}$
1	0,05	0,0025	0,025	0,00125
2	0,1	0,01	0,05	0,005
3	0,12	0,0144	0,06	0,0072
4	0,15	0,0225	0,075	0,01125
5	0,18	0,0324	0,09	0,0162
6	0,2	0,04	0,1	0,02
$\sum_{i=1}^n$	0,8	0,1218	0,4	0,0609

Расчет коэффициентов для оценки оптимальных параметров по данным из таблицы 2.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n m_i^2 \sum_{i=1}^n A_{i\text{эксп}} - \sum_{i=1}^n m_i^2 \sum_{i=1}^n m_i A_{i\text{эксп}}}{n \sum_{i=1}^n m_i^2 - (\sum_{i=1}^n m_i)^2} = 0,0074$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n m_i A_{i\text{эксп}} - \sum_{i=1}^n m_i \sum_{i=1}^n A_{i\text{эксп}}}{n \sum_{i=1}^n m_i^2 - (\sum_{i=1}^n m_i)^2} = 0,00608$$

$$b' = \frac{\sum_{i=1}^n m_i A_{i\text{эксп}}}{\sum_{i=1}^n m_i^2} = 0,0069$$

$$SQ = \sum_{i=1}^n A_{i\text{эксп}}^2 - a \sum_{i=1}^n A_{i\text{эксп}} - b \sum_{i=1}^n m_i A_{i\text{эксп}} = 1,96 \cdot 10^{-5}$$

$$S_{YC}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n A_{i\text{эксп}}^2 - a \sum_{i=1}^n A_{i\text{эксп}} - b \sum_{i=1}^n m_i A_{i\text{эксп}}}{(n-2)}$$

$$\frac{-b \sum_{i=1}^n m_i A_{i\text{эксп}}}{(n-2)} = 6,53 \cdot 10^{-6}$$

$$SQ' = \sum_{i=1}^n A_{i\text{эксп}}^2 - b' \sum_{i=1}^n m_i A_{i\text{эксп}} = 6,94 \cdot 10^{-5}$$

$$F = \frac{SQ' - SQ}{S_{YC}^2} = 7,62$$

$$F(\bar{P}, f_1 = n - 1, f_2 = n - 2) \text{ (табличное)} = 6,39$$

Так как фактическое значение $F > F$ табличное, то оценка уравнения регрессии статистически надежна.

Градуировочная зависимость определяется по формуле:

$$A_{\text{расч}} = a + b \cdot m. \quad (1)$$

Таблица 3. Расчетные данные формулы 8

№ п/п	m	$A_{\text{расч}}$
1	0,05	0,025
2	0,1	0,05
3	0,12	0,06
4	0,15	0,08
5	0,18	0,09
6	0,2	0,1

По данным таблицы 3 строится градуировочный график рисунок 1 для определения концентрации иона металла анализируемого раствора.



Рис. 1. – Градуировочный график для расчета свинца

Масса свинца рассчитывается из градуировочной зависимости по формуле 1.

Концентрация свинца в анализируемом растворе определяется по формуле 2 [10-12].

$$C_{\text{Pb}} = \frac{m_X}{V}, \quad (2)$$

где V – объем анализируемого раствора;

Таблица 4. Результаты измерений и расчетов для анализа количества свинца в растворе

№ измерения	Состав пробы	A	m_X , мг	C_{Pb} , мг/мл
1	Pb^{2+}	0,59	0,087	0,052
2	$\text{Pb}^{2+} + \text{Cu}^{2+}$	0,578	0,085	0,050
3	$\text{Pb}^{2+} + \text{Ni}^{2+}$	0,61	0,0897	0,055
4	$\text{Pb}^{2+} + \text{Co}^{2+}$	0,75	0,110	0,078
5	$\text{Pb}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$	0,63	0,093	0,058

6	$\text{Pb}^{2+} + \text{Zn}^{2+}$	0,6	0,088	0,054
---	-----------------------------------	-----	-------	-------

Так как ксиленовый оранжевый образует окрашенные соединения со многими элементами, необходимо предварительно замаскировать конкурентные ионы смесью, содержащей NH_4F и $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ с концентрациями $5 \cdot 10^{-3}$ и $5 \cdot 10^{-4}$ соответственно, а также 0,02% аскорбиновую кислоту. Смесью добавляется в количестве 5 мл на 25 мл раствора и маскирует ионы Fe, Co, Ni, Mn, Cu.

Отбирается аликвота 0,5 мл и переносится в колбу на 50 мл к ней добавляют 10 мл буферного раствора с pH 4,5 и 10 мл ксиленолового оранжевого известной концентрации $2 \cdot 10^{-2}$ моль/л. Раствор доводится до метки водой и спустя 15 минут измеряется оптическая плотность. По градуировочному графику определяется концентрация раствора и с учетом разбавления рассчитывается концентрация свинца в исходном растворе.

Сначала рассчитывается коэффициент очистки по формуле 4, исходная концентрация свинца 0,25 мг/мл, равновесная – концентрация ионов после сорбции. Далее рассчитывается эффективность очистки (степень извлечения металла из раствора) и степень очистки по формуле [4]. Коэффициент распределения находится по формуле [5]. Данные заносятся в таблицу 5.

Таблица 5. Расчет концентрации с учетом разбавления раствора свинца

Ионный состав пробы	C_{Pb} , мг/мл	C_{Pb} , мг/мл с учетом разбавления в 50 раз
1(Pb^{2+})	0,00112	0,0562
2($\text{Pb}^{2+} + \text{Cu}^{2+}$)	0,00356	0,178
3 ($\text{Pb}^{2+} + \text{Ni}^{2+}$)	0,00100	0,05
4($\text{Pb}^{2+} + \text{Sr}^{2+}$)	0,00350	0,1748
5($\text{Pb}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$)	0,00253	0,1264
6($\text{Pb}^{2+} + \text{Zn}^{2+}$)	0,00120	0,0598

Таблица 6. Результаты расчета адсорбционных характеристик сорбции свинца

Ионный состав пробы	Коч.	E, %	K_p
1(Pb^{2+})	4,448	77,52	344,84
2($\text{Pb}^{2+} + \text{Cu}^{2+}$)	1,404	28,80	40,45
3 ($\text{Pb}^{2+} + \text{Ni}^{2+}$)	5,000	80,00	400,00
4($\text{Pb}^{2+} + \text{Co}^{2+}$)	1,430	30,08	43,02
5($\text{Pb}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$)	1,978	49,44	97,78
6($\text{Pb}^{2+} + \text{Zn}^{2+}$)	4,181	76,08	318,06

Данные результаты отражают избирательность извлечения ионов свинца в условиях конкурентной сорбции. Такие ионы как Zn^{2+} и Ni^{2+} практически не оказывают влияния на эффективность извлечения свинца из раствора.

Выводы

Исследована эффективности сорбции органическим сорбентом на основе рисовой шелухой (RNA) при извлечении Pb (II) в присутствии тяжелых металлов Fe (III), Zn (II), Ni (II), Cu (II) и Co (II).

Изучена конкурентная сорбция в мультиметаллических системах, определены коэффициенты очистки и распределения для свинца.

Результаты исследований могут использоваться для дальнейшего изучения сорбционных характеристик органических сорбентов в сложных смесях.

Список литературы

1. Черкашина Н.И. Оценка эффективности новых сорбционных материалов при очистки водных сред / В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина // Энергетические установки и технологии. - 2019. - Т.5. № 1. - С. 115 – 121.
2. Черкашина Н.И. Характер зависимости эффективности очистки дезактивационных вод сорбентом «Фолиокс-КГО» при изменении концентрации солей и поверхностно активных веществ / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев, В.Б. Копарушкина // 36. наук. пр. СТУЭтаП. – Севастополь: СТУЭтаП, 2010. – Вып. 1 (33). – С. 90 – 95.
3. Черкашина Н.И. Выбор комбинации фильтрующего материала в зависимости от технологических параметров процесса и очищаемой среды / Н.И. Черкашина // Энергетические установки и технологии. - 2018. - Т.4. № 3. - С. 92-98.
4. Пат. 78908 Украины, МПК51 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 Севастопольский нац. ун-т ядерной энергии и промышленности. – № u 2012 09109; заявл. 10.04.2013; опубл. 12.07.13, Бюл. № 7. – 5 С.
5. Черкашина Н.И. Очистка сточных вод от ионов металлов сорбентами из природных материалов на основе лигнина / Н.И. Черкашина, А.С. Черкашин, И.И. Марончук // Новый университет. Серия: Технические науки. 2015. № 11-12 (45-46). С. 51-57.
6. Черкашина Н.И. Исследование эффективных сорбционных материалов для извлечения радионуклидов из технологических сред / Н.И. Чер-

кашина, О.В. Ведищева // Материалам научно-практической конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности» (15 – 18 июня 2016 г., г. Севастополь). – Севастополь: СевГУ, 2016. – 356 с.

7. Черкашина Н.И. Технология получения сорбционных материалов на основе лигнина для утилизации жидких радиоактивных отходов / Н.И. Черкашина // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук – Севастополь: изд-во СТУЭтаП, 2011. – С. 22.
8. Черкашина Н.И. Использование сорбентов на основе отходов переработки растительного сырья при очистке сточных вод и технологических сред / В.А. Ерофеев, Е.А. Кульченко, Н.И. Черкашина // Экологическая безопасность. - 2013. - № 2 (16). - С. 89-92.
9. Черкашина Н.И. Научные аспекты и технико-экономические характеристики сорбентов типа «Фолиокс» / В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина // Естественные и технические науки. - 2019. - №3 (129). - С. 52-54.
10. Ерофеев В.А. Выделение урана из технологических сред сорбентом на основе лигнина / В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т.4. № 4. – С. 121 – 126.
11. Черкашина Н.И. Конкурентная сорбция лигниновых препаратов для очистки сточных вод. / А.В.Любушкина, А.О.Литвинова, Н.И. Черкашина // Энергетические установки и технологии. – 2018. –Т.4. № 2. –С. 109-115.
12. Черкашина Н.И. Разработка перспективных сорбентов на основе органического сырья для извлечения тяжелых металлов / А.В.Любушкина, Н.И. Черкашина // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т.4. № 2. – С. 103-109.
13. Способ получения селективного сорбента патент на изобретение № 2015119875 / В.А. Ерофеев, Э.А. Кульченко, И.И. Пилипченко - заявл. 26.06.2015; опубл. 9.07.2016.

References

1. Cherkashina N. I. Evaluation of the effectiveness of new sorption materials for water purification / V. A. Erofeev, N. I. Cherkashina // Power plants and technologies. - 2019. - Vol.5. No. 1. - P. 115 – 121.
2. Cherkashina N. I. The nature of the dependence of the cleaning efficiency of decontamination water sorbent "Felix-KGO" when you change the concentration of salts and surfactants / N. I. Cherkashin, V. A. Erofeev, V. B. Caporuscio // zbornik scientific papers SNUE and I. Sevastopol: SNUEI, 2010. V. 1, N 33. - P. 90 – 95.

3. Cherkashina N. And. Select the combination of filter material depending on the technological parameters of the process and clean up the environment/ N.And. Cherkashin // *Energy and technology*. - 2018. – Volume 4. No. 3. - P. 92-98.
4. Cherkashina N.I., Erofeev V. A., Pat. 93824 Ukraine, IPC 51 B 01 J 20/22, B 01 J 20/30, C 02 F 1/28. Metodproizvodstvamodificirovannogokostochkovogosorbenta "Foliox- MSP" [A method of producing stone of the modified powder of organic sorbent "Foliox- MSP"]; the applicant and patent-winner of Sevastopol national University of nuclear energy and industry № A 2010 04280; - 13.04.2010; publ. 12.07.10. – P 5.
5. Cherkashina N.I., Cherkashin A. S, Maronchuk I. I. Ochistkastochnixvodotiovmetallovsorbentamiizprirodnimaterialovnaosnovelignina [Wastewater treatment from metal ions by sorbents from natural materials based on lignin] New University. Series: Technical Sciences. 2015. No. 11-12 (45-46). S. 51-57.
6. Cherkashina N.I., Vedischeva V.A. Issledovanieeffektivnostisorbcionnixmaterialovdljaizvlechenijzradionuclidoviztexnologicheskixsred [The study of effective sorption materials for extraction of radionuclides of technological environments Materials of scientific-practical conference "Topical issues of nuclear-chemical technologies and ecological safety" (15 – 18 June 2016, Sevastopol). –Sevastopol: SevGU, 2016. – 356 p.
7. Cherkashina N.I. Texnologijapolychenijzorbcionnixmaterialovnaosnoveligninadljajutilizacijidkihradioaktivnixotxodov[The technology of obtaining sorption materials based on lignin for utilization of LRW] The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences – Sevastopol: publishing house SNUNE and industry 2011. – P. 22.
8. Cherkashina N.I., Erofeev V.A, Kultenko E.A. ispolzovaniesorbentovnaosnovetodovpererabotkirastitelnogosirjzpriochistkestochnixvod I tehnologicheskixsred [The use of sorbents based on waste processing of vegetable raw materials in the purification of wastewater and technological environments.] *Environmentalsafety*, 2013, theIssue-Vol. 2(16) – Pp. 89-92.
9. Cherkashina N. And. The scientific aspects and technical-economic characteristics of the sorbents of the type "Folyox" / V. A. Erofeev, N. And. Cherkashin // *Natural and technical Sciences*. - 2019. - No. 3 (129). - P. 52-54.
10. Erofeev.A. Isolation of uranium from technological media by sorbent on the basis of lignin / V. A. Erofeev, N. I. Cherkashina // *Energy conditions and technologies*. – 2018. - Vol. 4. No. 4. – S. 121 – 126.
11. Cherkashina N. I. Competitive sorption of lignin preparations for wastewater treatment./ A. V. Lyubushkina, A. O. Litvinova, N. And. Cherkashin // *Energy and technology*. – 2018. - Vol. 4. No. 2. –P. 109-115.
12. Cherkashina N. Development of promising sorbents based on organic raw materials for the extraction of heavy metals / A.V. Lyubushkina, N. I. Cherkashina // *Power plants and technologies*. – 2018. - Vol. 4. No. 2. – P. 103-109.
13. Erofeev V. The method of obtaining selective sorbent patent for the invention № 2015119875 / V. A. Erofeev, E. A. Kolchenko, I. I. Pilipenko - Appl. 26.06.2015; publ. 9.07.2016

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 591.148:574.52(262.5)

Современные способы оперативной оценки экологического состояния прибрежных акваторий *in situ*: опыт применения

Н.В. Лямина¹, М.А. Косовская²

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия

e-mail: ¹ BurmistrovaN@mail.ru, ² sevtania@rambler.ru

Статья поступила 13.09.2019 г.; после доработки 17.09.2019 г.

Аннотация

Показана возможность использования для оперативной оценки экологического состояния прибрежных акваторий современного зондирующего гидробиологического комплекса «Сальпа-МА» с компьютерной обработкой измеряемой информации, позволяющего в короткий срок в морских условиях получить синхронные комплексные оценки биотических и абиотических факторов и по полученным данным, при лабораторной обработке, выявить функциональные связи морских организмов с факторами среды и выявить особенности их развития.

Ключевые слова: морская экосистема, Черное море, прибрежная зона, биолюминесценция, концентрация хлорофилла-а, Севастополь.

Modern methods of rapid assessment of the ecological status of coastal waters *in situ*: application experience

N.V. Lyamina, M.A. Kosovskaya

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia

e-mail: ¹ BurmistrovaN@mail.ru, ² sevtania@rambler.ru

Received 13.09.2019 y.; received in final form 17.09.2019 y.

Abstract

The possibility of using for the rapid assessment of the ecological condition of the coastal waters of the modern probing hydrobiological complex «Salpa-MA» with computer processing of the measured information allowing in a short time in marine conditions to obtain simultaneous integrated assessments of biotic and abiotic factors and using laboratory data to show functional connection of marine organisms with environmental factors and identify the features of their development.

Keywords: the marine ecosystem, the Black Sea, the coastal zone, the bioluminescence, concentration chlorophyll-a, Sevastopol

Введение

Изучение пространственной структурированности морских экосистем, взаимодействие их различных компонентов и исследование механизмов формирования их гетерогенности относятся к числу наиболее важных проблем современной гидроэкологии.

Постоянно возрастающие потребности общества в создании новых материалов ведут к увеличению количества воздействующих на биоту химических соединений антропогенного происхождения [1-3]. Необходимость проведения экологического мониторинга в связи с решением фундаментальных проблем изучения пространственной структуры и закономерности

стей существования морских прибрежных экосистем очевидна. Однако вряд ли можно добиться успехов, используя только общепринятые в гидробиологии методы исследования, позволяющие с высокой точностью оценить состояние экосистемы, но требующие длительного времени по сбору сетных и батометрических проб и не способных «отследить» всю гамму токсичных соединений и не учитывающих возникающие при их воздействии синергические эффекты [4]. Необходим поиск новых методов биомониторинга морской среды, результаты которого носили бы универсальный (интегральный) характер и могли служить как показателем хронологической структуры исследуемого ценоза, так и его физиологического состояния [1, 5, 6].

Биолюминесценция – проявление жизнедеятельности организма в виде электромагнитного излучения в видимой области спектра, является важнейшим экологическим и оптическим фактором морской среды. Воздействие биотических, абиотических и антропогенных факторов способно существенно изменять характеристики светоизлучения гидробионтов.

Более 80 % известных видов биолюминесцентных организмов – морские организмы [7]. Поле биолюминесценции – суммарный световой эффект, создаваемый совокупностью морских биолюминесцентных организмов в толще воды [3]. Поле биолюминесценции существует повсеместно в любое время суток при существенных региональных и сезонных различиях [8]. В отличие от гидрооптического поля, создаваемого физическими излучателями, поле биолюминесценции подчиненно множественному действию биологических регуляторов. Современный интерес к исследованию биолюминесценции определяется не только стремлением понять ее биологический смысл, но и тем, что исследование динамики характеристик биолюминесценции водной толщи актуально для выявления общих закономерностей функционирования планктонных сообществ, а также причин, вызывающих их изменчивость во времени и пространстве и связанных с их жизнедеятельностью гидрофизических и гидрохимических факторов [9]. Параметры биолюминесценции гидробионтов могут служить чувствительным индикатором степени их резистентности к воздействию поллютантов и экспрессным показа-

телем регионального загрязнения морской среды.

Материалы и методы исследований

Для оценки современного состояния морских экосистем прибрежной зоны Крыма было использовано оборудование:

- 1) маломерное судно «Фортуна-С» с подвесным двигателем – 2 ед.;
- 2) гидробиологический автоматизированный комплекс «Сальпа-МА» – 1 ед. (измерительный канал биолюминесценции (ИКБ, измерительный канал фотосинтетически активной радиации (ФАР), измерительный канал концентрации хлорофилла-а (ИКХ), измерительный канал давления и температуры (ИДТ), измерительный канал электропроводности (ОЭП));
- 3) эхолот Garmin-42dv – 1 ед.;
- 4) телеуправляемый необитаемый подводный аппарат «Марлин-350» – 1 комплект

В основе методов исследования лежат инструментальные измерения амплитудных параметров поля биолюминесценции, а также выяснение их сопряженности с фоновыми характеристиками среды. Инструментальные измерения проводились *in situ* с использованием нового гидробиологического комплекса «Сальпа-МА» (рис.1). Гидробиологический комплекс «Сальпа-МА» предназначен для исследования интенсивности биолюминесцентного излучения в деятельном слое водной среды (0 – 200 м) в режиме многократного вертикального зондирования со скоростью до 1,2 м/с, с одновременным непрерывным измерением концентрации хлорофилла-а, температуры водной среды, гидростатического давления и электропроводности (расчетная соленость) на горизонте нахождения прибора. Проведение работ возможно с любого маломерного судна, пирса. Время разворачивания составляет не более 5 минут. Исследования морских донных ландшафтов в прибрежной зоне Крымского полуострова проводилось с помощью дистанционно управляемого подводного аппарата «Марлин-350» (рис. 2). Весь материал по изменению интенсивности поля биолюминесценции и фоновых характеристик среды подвергался различным формам математической обработки с помощью методов одномерной и многомерной статистики.



Рис. 1. Гидробиологический комплекс «Сальпа-МА» (фото авторов)

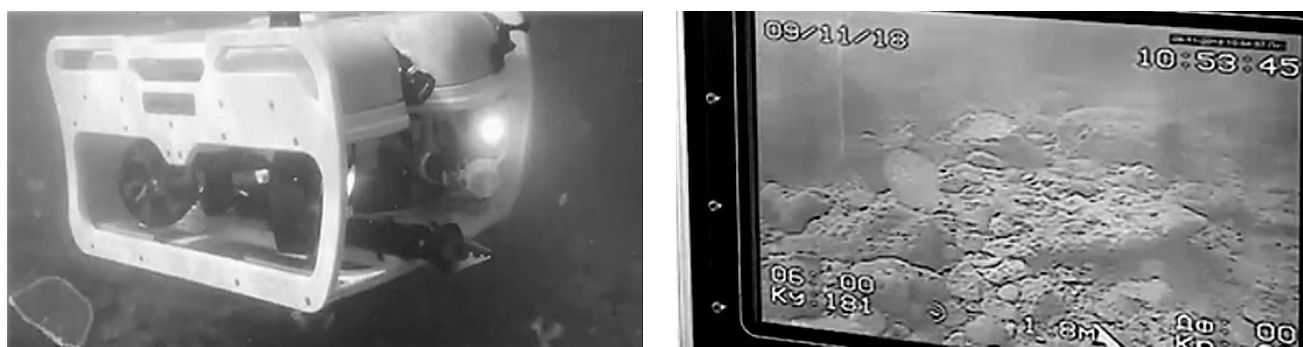


Рис. 2. Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат «Марлин-350» в экспедиции «Крым – 2018» (фото авторов)

Для анализа данных применялись методы корреляционного, кластерного, дискриминантного и факторного анализа. Математическая обработка результатов проводилась с использованием программ Microsoft Excel 7.0, SPSS, Statistica 6.0.

Результаты и их обсуждение

Морская прибрежная зона Крымского полуострова характеризуется высокой динамичностью, а также наличием вдольбереговой циркуляции. Во взаимосвязанную систему прибрежных течений вовлекаются имеющиеся

в прибрежных акваториях мелководные выпуски хозяйственно-бытовых сточных вод с органическими загрязнителями, а также поступающее из донных осадков вторичное загрязнение, что приводит к деградации любой составной части его акватории и может необратимо повлиять на экологическую ситуацию побережья Крымского полуострова в целом [2, 4, 10-12]. В общей проблеме загрязнения прибрежной зоны Крымского полуострова, одно из ведущих мест по наносимому ущербу, принадлежит углеводородам, в первую очередь нефти и нефтепродуктам [13]. При этом отмечается глобальный характер их распространения и значительная степень опасности для морских организмов, так как идентификация нефтяного загрязнения и выявление его последствий составляет существенную сторону процесса мониторинга окружающей среды. Качественно новым фактором являются токсические соединения - продукты техногенной деятельности человека. Большинство загрязняющих веществ, попадает

в морскую воду, создают ситуации локального, регионального либо глобального загрязнения, вследствие чего нарушается естественный ход биологических процессов. При этом необходимо учитывать, что появление токсических соединений связано не только с терригенным стоком или катастрофами на морских судах, но и миграцией через воздушное пространство [14].

Для оперативной оценки загрязнения побережья Крымского полуострова возможно применять параметры билюминесцентных характеристик планктонных организмов и создаваемое ими световое поле (поле билюминесценции) [2, 8, 15, 16].

Выявлено, что основной вклад в формирование поля билюминесценции Черного моря вносит 51 вид Dinophyceae, родов: *Alexandrium*, *Ceratium*, *Gonyaulax*, *Lingulodinium*, *Noctiluca*, *Polykrikos*, *Protoceratium*, *Protoperidinium*, *Pyrocystis*, *Scrippsiella*, *Tripes* (рис. 3-9) [17].

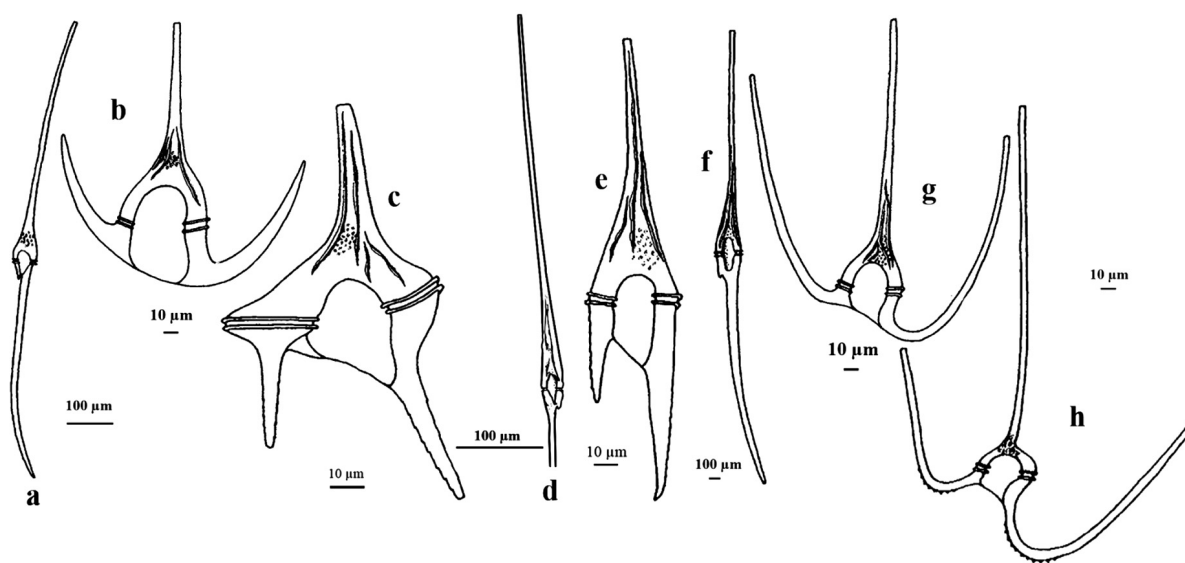


Рис. 3. Dinophyceae, семейство Ceratiaceae: а - *Ceratium inflatum* (Kofoid) E.G.Jørgensen, 1911; б - *Ceratium tripos* (O.F.Müller, 1776) Nitzsch, 1817; в - *Tripes candelabrus* (Ehrenberg, 1860) F.Gómez, 2013; д - *Tripes extensus* (Gourret, 1883) F.Gómez, 2013; е - *Tripes furca* (Ehrenberg, 1834) F.Gómez, 2013; ф - *Tripes fusus* (Ehrenberg, 1834) F.Gómez; г - *Tripes horridus* (Cleve, 1897) F.Gómez, 2013; г - *Tripes macroceros* (Ehrenberg, 1841) F.Gómez, 2013 [18]

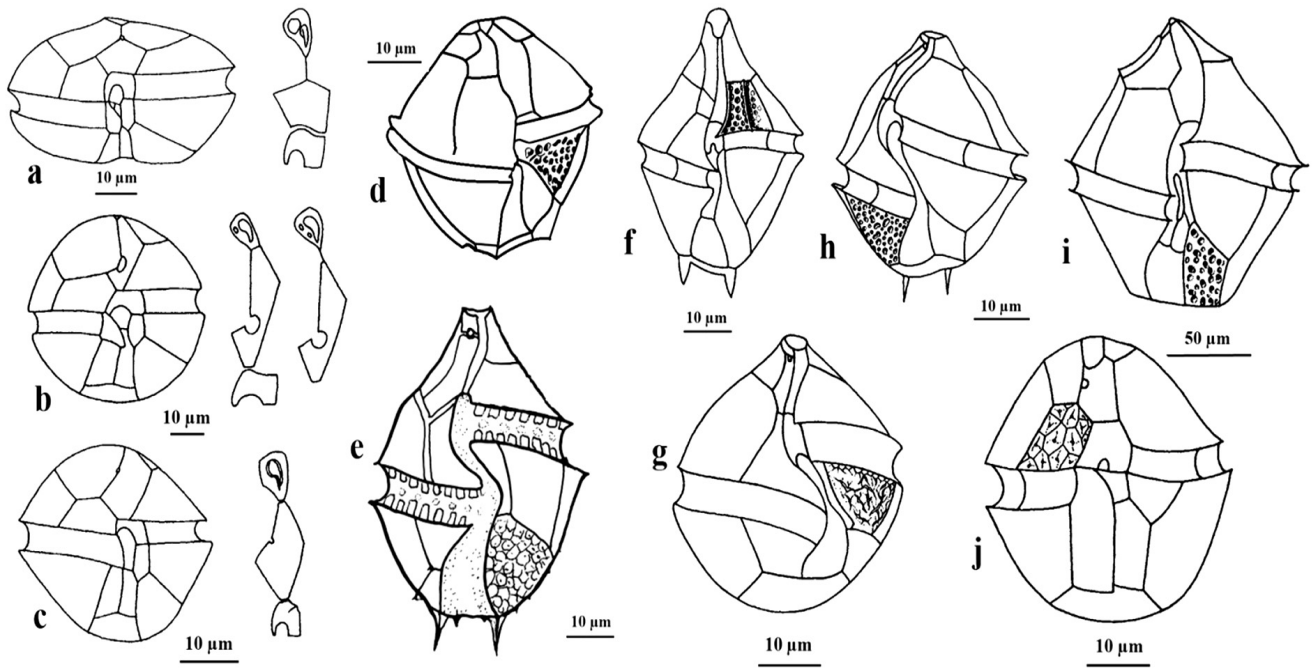


Рис. 4. Dinophyceae, семейство Gonyaulacaceae: а - *Alexandrium monilatum* (J.F.Howell, 1953) Balech, 1995; б - *Alexandrium ostenfeldii* (Paulsen, 1904) Balech & Tangen, 1985; в - *Alexandrium tamarense* (Lebour, 1925) Balech, 1995; д - *Gonyaulax apiculata* Entz, 1904; е - *Gonyaulax digitale* (Pouchet, 1883) Kofoid, 1911; ф - *Gonyaulax polygramma* Stein, 1883; г - *Gonyaulax scrippsae* Kofoid, 1911; h - *Gonyaulax spinifera* (Claparède & Lachmann, 1859) Diesing, 1866; и - *Lingulodinium polyedrum* (Stein, 1883) Dodge, 1989; j - *Protoceratium reticulatum* (Claparède & Lachmann, 1859) Bütschli, 1885 [18, 19]

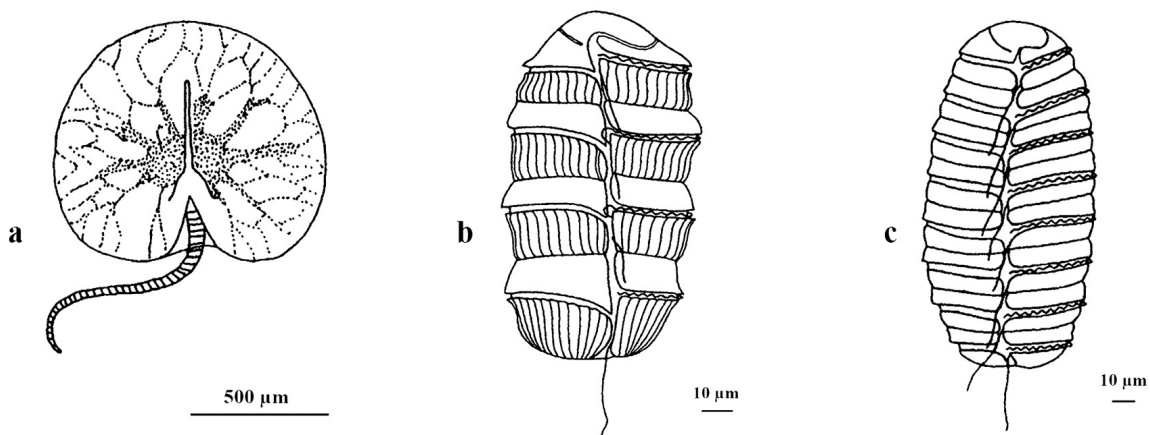


Рис.5. Dinophyceae, семейство Noctilucaeae и Polykrikaceae: а - *Noctiluca scintillans* (Macartney, 1810) Kofoid et Swezy, 1921; б - *Polykrikos kofoidii* Chatton, 1914; в - *Polykrikos schwarzii* Bütschli, 1873 [18]

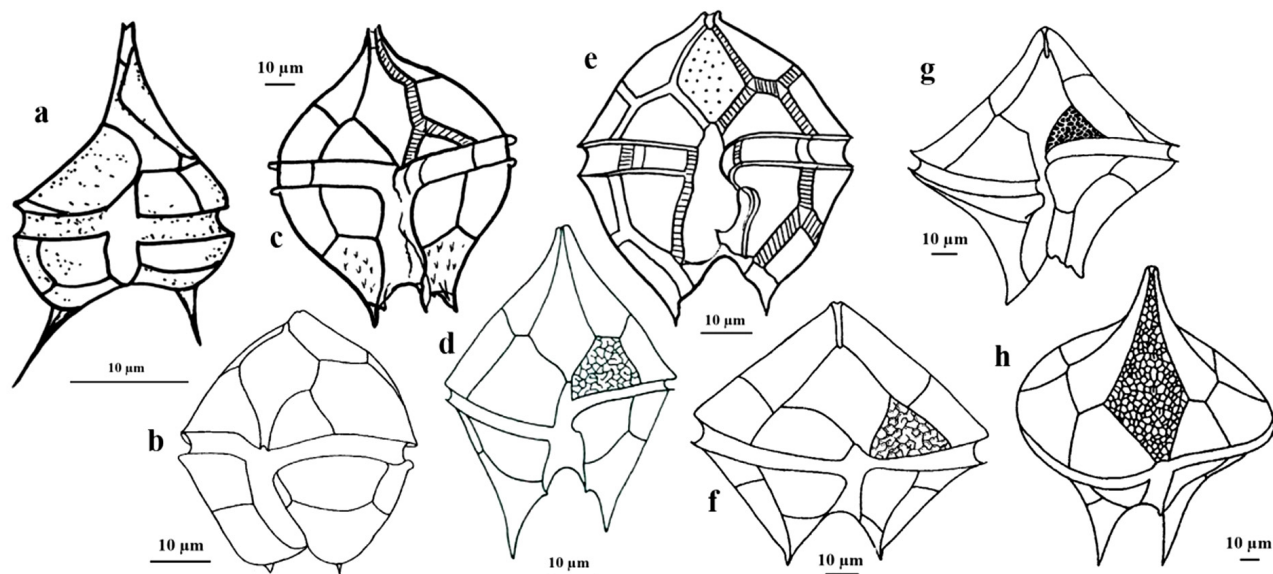


Рис.6. Dinophyceae, семейство Protoperidiniaceae: a - *Protoperidinium bipes* (Paulsen, 1904) Balech, 1974; b – *Protoperidinium brevipes* (Paulsen, 1908) Balech, 1974; c – *Protoperidinium brochii* (Kofoid & Swezy, 1921) Balech 1974; d – *Protoperidinium claudicans* (Paulsen, 1907) Balech, 1974; e – *Protoperidinium conicoides* (Paulsen, 1905) Balech, 1973; f – *Protoperidinium conicum* (Gran, 1900) Balech, 1974; g – *Protoperidinium conicum* (Gran, 1900) Balech, 1974; h – *Protoperidinium depressum* (Bailey, 1854) Balech, 1974 [18, 19]

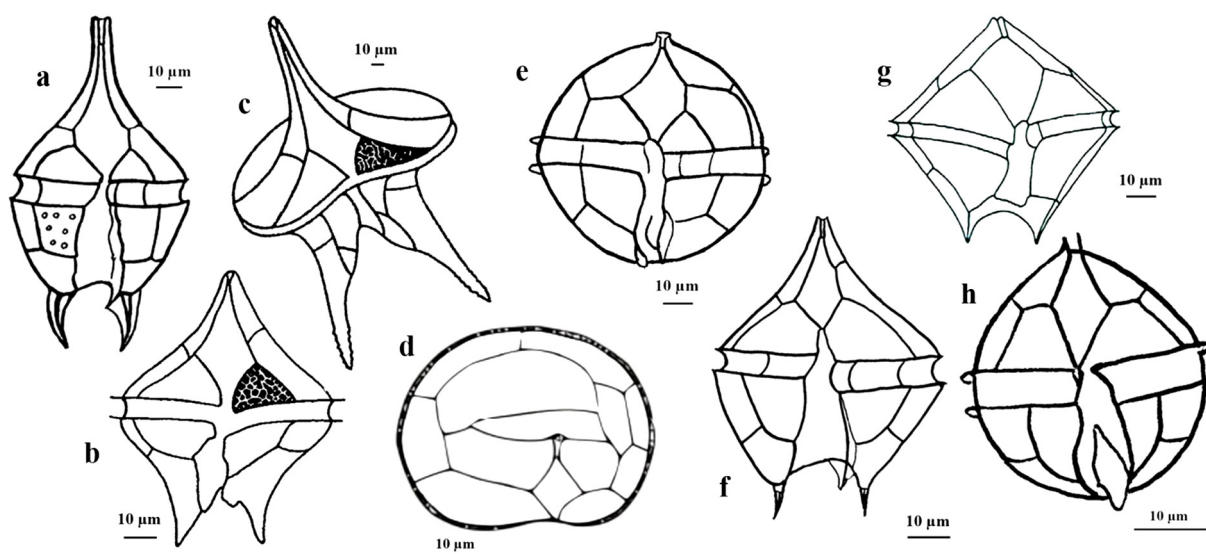


Рис.7. Dinophyceae, семейство Protoperidiniaceae: a - *Protoperidinium diabolium* (Cleve, 1900) Balech, 1974; b – *Protoperidinium divergens* (Ehrenberg, 1840) Balech, 1974; c – *Protoperidinium elegans* (Cleve, 1900) Balech, 1974; d – *Protoperidinium excentricum* (Paulsen, 1907) Balech, 1974; e – *Protoperidinium globulum* (Stein, 1883) Balech, 1974; f – *Protoperidinium granii* (Ostenfield, 1906) Balech, 1974; g – *Protoperidinium leonis* (Pavillard, 1916) Balech, 1974; h – *Protoperidinium minutum* (Kofoid, 1907) Loeblich III, 1970 [18, 19]

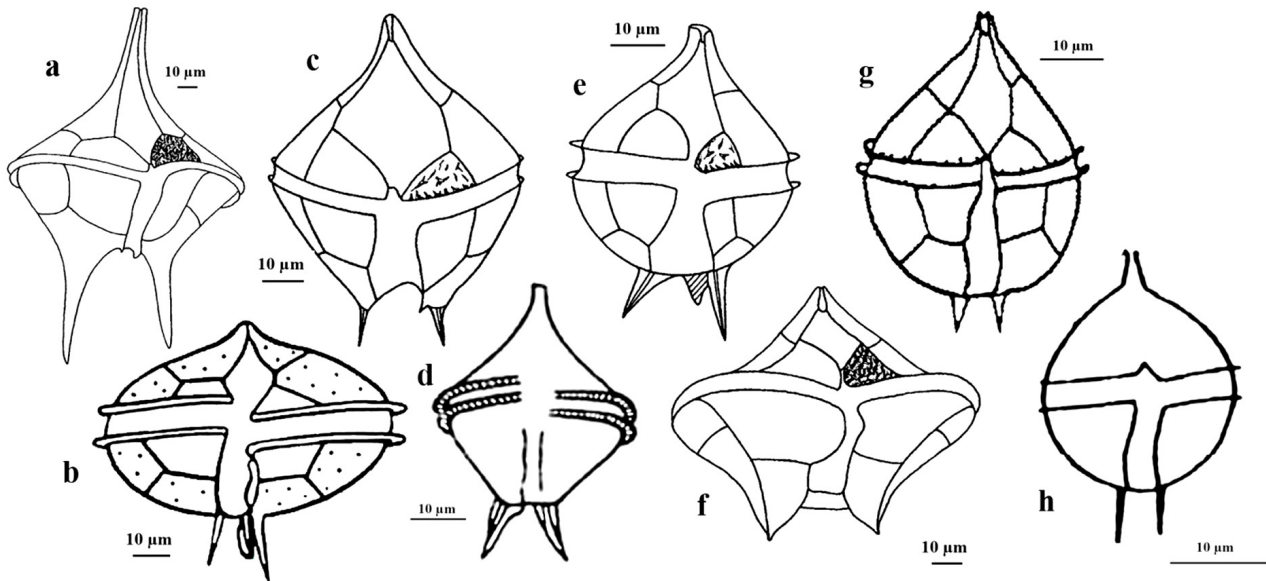


Рис.8. Dinophyceae, семейство Protoperidiniaceae: а - *Protoperidinium oceanicum* (VanHöffen, 1897) Balech, 1974; б - *Protoperidinium ovatum* Pouchet, 1883; в - *Protoperidinium pallidum* (Ostenfeld, 1899) Balech, 1973; д - *Protoperidinium pedunculatum* (Schütt, 1895) Balech, 1974; е - *Protoperidinium pellucidum* Bergh, 1882; ф - *Protoperidinium pentagonum* (Gran, 1902) Balech, 1974; г - *Protoperidinium pyriforme* (Paulsen, 1905) Balech, 1974; h - *Protoperidinium sinaicum* (Matzenauer, 1933) Balech, 1974 [18-20]

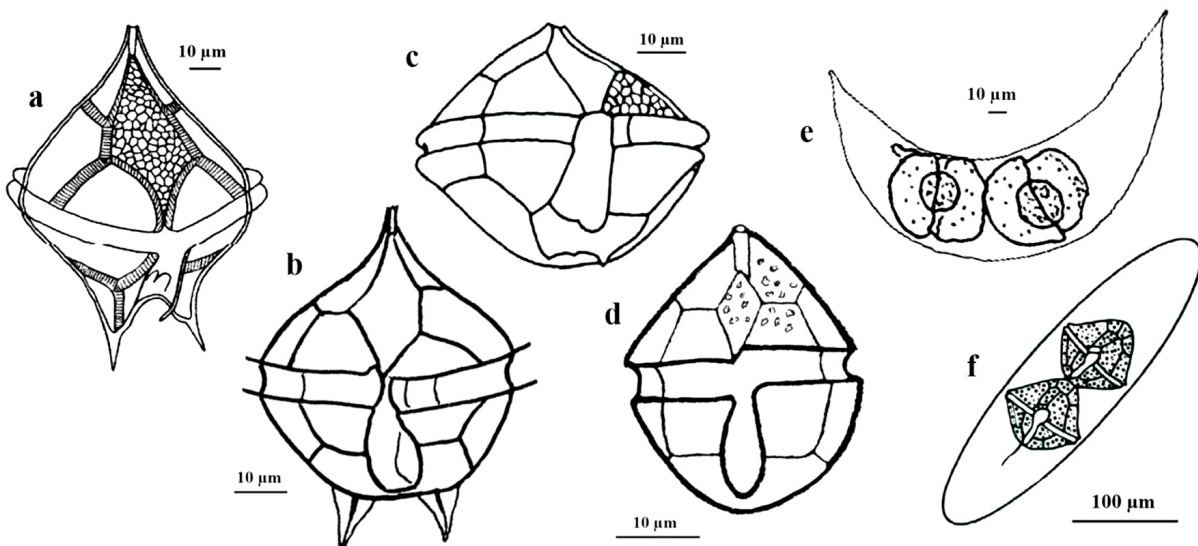


Рис.9. Dinophyceae, семейство Protoperidiniaceae, Peridiniaceae и Pyrocystaceae: а - *Protoperidinium solidicorne* (Mangin, 1926) Balech, 1974; б - *Protoperidinium steinii* (Jørgensen, 1889) Balech, 1974; в - *Protoperidinium subinerme* (Paulsen, 1904) Loeblich III, 1969; д - *Scrippsiella trochoidea* (Stein, 1883) Loeblich III, 1976; е - *Pyrocystis lunula* (Schütt, 1895) Schütt, 1896; ф - *Pyrocystis pseudonociluca* Wyville-Thompson, 1876 [18-20]

У 30 видов Dinophyceae характеристики светоизлучения определены инструментально в условиях Черного моря сотрудниками отдела биофизической экологии Института морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского [3, 8].

Также стоит отметить существенный вклад биолюминесцентных гребневиков-вселенцев *Mnemiopsis leidyi* (A. Agassiz, 1865) и *Beroe ovata* (Mayer, 1912) в формирование поля био-

люминесценции прибрежной зоны г. Севастополя [21].

Существование Dinophyceae в условиях комплексного загрязнения способствует формированию более низких порядков светоизлучения. Свет у динофлагеллят производится в органоидах – сцинтиллонах, особые частицы диаметром приблизительно 0,5-0,9 мкм, в которые собраны люциферин, люцифераза и которые во множестве содержатся в клетках [22]. Поступление во внешнюю среду ионов

свинца, меди и ртути приводит к дегенеративным изменениям в мембранах, ответственных за энергетические процессы в организме [23]. Это неудовлетворительно сказывается на физиологическом состоянии организмов, вызывает уменьшение количества способных к высвечиванию сцинтиллонов и сопровождается изменением амплитуды светоизлучения *Dinophyceae*. Известны также и другие возможные механизмы воздействия токсикантов на биолюминесценцию планктонных водорослей. Так, избыточное количество свинца и других тяжелых металлов в среде приводит к частичному ингибированию энзимов [24].

Корреляционная связь между величиной биолюминесцентного потенциала и количеством водорослей, четко выраженная в чистых районах, нарушается в загрязненных акваториях [5, 6].

В работе О.В. Машуковой [21] показано влияние тяжелых металлов на характеристики светоизлучения у *Stenophora* - воздействие тяжелых металлов приводит к изменению энергетических и временных характеристик их светоизлучения. По силе токсического воздействия на параметры биолюминесценции гребневиков исследованные в экспериментах металлы располагаются в последовательности: $Zn < Cu < Hg < Pb$.

В работе Ю.Н. Токарева с соавторами [14] выяснены некоторые важные закономерности, сопровождающие или отражающие процессы адаптации одноклеточных водорослей к воздействию различных физических и химических факторов. Так, зарегистрирована высокая функциональная чувствительность водорослей, в частности, биолюминесцентной системы и короткий латентный период отклика биолюминесцентной системы на воздействие поллютантов различного происхождения. Показано, что малые дозы ионизирующей радиации и низкие концентрации углеводов оказывают стимулирующее воздействие на амплитуду светоизлучения *Noctiluca scintillans* (Macartney, 1810) на определенных этапах адаптационного синдрома. Выявлена динамика характеристик биолюминесценции *N. scintillans* после воздействия поллютантов различной природы, которая носит характер затухающих колебаний, амплитуда и фаза которых определяется величиной их дозы или концентрации.

При анализе вертикальных профилей интенсивности поля биолюминесценции в прибрежной зоне Крымского полуострова

подтверждено наличие двух областей повышенной интенсивности поля биолюминесценции (поверхностный и глубинный максимум). При этом биолюминесцентный потенциал планктонных организмов в загрязненных и чистых районах существенно отличается.

Режим многократного зондирования гидробиологического комплекса «Сальпа-МА» позволил получить мелкомасштабную горизонтальную неоднородность поля биолюминесценции, визуализирующую структурированность биолюминесцентных гидробионтов в условиях градиентов гидрологических параметров. Количество зондов определялось лишь резервом времени. Полученные данные отражены на рис.10 (см. обложку 3 журнала). Временной интервал и расстояние между зондами, а, следовательно, и размер неоднородностей, оценивали по координатам, получаемых с помощью судовой системы навигации и портативной GPS-станции (Эхолот Garmin-42dv). Расстояние между зондами на рис.10 соответствует 75 м.

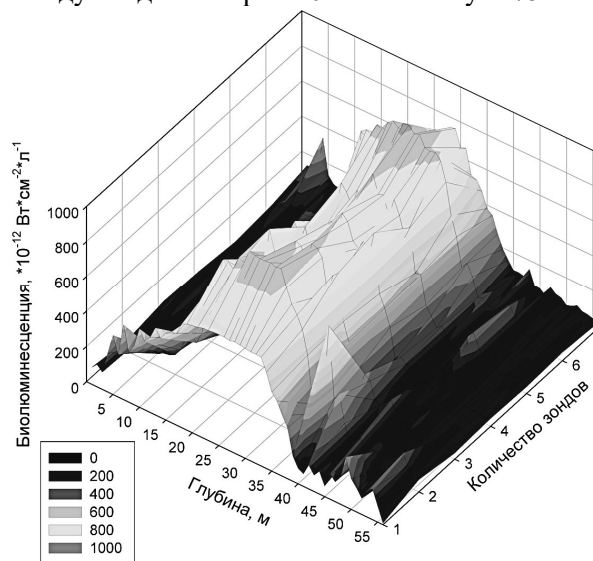


Рис.10. Мелкомасштабная пространственная неоднородность поля биолюминесценции в режиме многократного зондирования гидробиологическим комплексом «Сальпа-МА»

Проведены расчеты коэффициентов корреляции и получены уравнения регрессии между измеряемыми характеристиками пелагиали в верхнем 10-м слое:

Параметры	Коэффициент корреляции	Уравнение регрессии
БиOLUMиНесценция (В, Вт/(см ² ·л ⁻¹) – температура (Т, °С)	r = -0,61	y = -118429,68+5220,88·x
БиOLUMиНесценция (В, Вт/(см ² ·л ⁻¹) – соленость (S, ‰)	r = 0,56	y = -35662,33-19895,48·x
БиOLUMиНесценция (В, Вт/(см ² ·л ⁻¹) – концентрация хлорофилла-А (Схл "А", мкг/дм ³)	r = 0,66	y = 1720,87+624,07·x

Заключение

Полевые исследования современного состояния морских экосистем в прибрежной зоне Крымского полуострова позволили сделать следующие выводы:

- 1) Поле биOLUMиНесценции в прибрежной зоне Крымского полуострова существует повсеместно при существенных региональных и сезонных различиях.
- 2) Основной вклад в формирование поля биOLUMиНесценции прибрежной зоны Крымского полуострова вносят динофитовые водоросли.
- 3) Параметры биOLUMиНесценции планктонтов могут служить чувствительным индикатором степени их резистентности к воздействию поллютантов и экспрессным показателем регионального загрязнения морской среды.
- 4) БиOLUMиНесцентный потенциал планктонных организмов в загрязненных и чистых районах существенно отличается.

Список литературы

1. Konovalov S.M. Anthropogenic impact and ecosystems of the Black Sea, CIESM Sci. Ser., 1. 1995. P. 53-83.
2. Рубцова С.И., Лямина А.Г., Лямина Н.В., Пузаков М.В., Пузакова Л.В. Разработка научных основ интегрированного управления прибрежной зоной Крыма. / Системы контроля окружающей среды – 2016. – Вып.4(24), С.135 -141.
3. Токарев Ю.Н. Основы биофизической экологии гидробионтов / Юрий Николаевич Токарев // Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 342 с.
4. Tokarev Yu.N., Evstigneev P.V., Vasilenko V.I., Mashukova O.V., (Burmistrova) Lyamina N.V. Bioluminescence of plankton organisms as an index of the neritic aquatoria pollution. Proceedings of the Eighth Intern. Conf. on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 07, 13 – 17 November 2007, Alexandria, Egypt, Middle East Technical University, Ankara, Turkey. Vol. 2. P. 925- 936.
5. Нарусевич Т.Ф., Шайда В.Г., Евстигнеев П.В., Давыдов В.В. Взаимосвязь структуры планктона и биOLUMиНесценции как метод биомониторинга Черного моря / В кн. под ред. В.И. Беляева. Экология и рациональное использование природных ресурсов южного региона Украины. – Севастополь, Изд-во МГИ НАНУ, 1985. – С. 273 –276.
6. Нарусевич Т.Ф., Токарев Ю.Н. Фитопланктон и биOLUMиНесценция в Средиземном море в летний период // Гидробиологический журнал – 1989. – 25, № 6. – С. 10–16.
7. Shimomura O. Bioluminescence: Chemical Principles and Methods. World Scientific Publishing, Singapore. 2006.
8. Лямина Н.В. Динамика параметров поля биOLUMиНесценции в Чёрном море и их сопряжённость с факторами среды : дис. ... канд. биол. наук. – Севастополь, 2014. – 133 с.
9. Гительзон, И.И., Левин, Л.А., Утюшев, Р.Н., Черепанов, О.А., Чугунов Ю.В. БиOLUMиНесценция в океане. - С.-Петербург: Гидрометеоздат, 1992.- 283 с.
10. Битюков Э.П., Евстигнеев П.В., Токарев Ю.Н. Светящиеся Dinoflagellata Черного моря и влияние на них антропогенных факторов // Гидробиол. журн. – 1993. – Т. 29. С. 27– 34.
11. Брянец В.А., Брянцева Ю.В. Многолетние изменения в фитопланктоне глубоководной части Черного моря в связи с естественными и антропогенными факторами // Экология моря. – 1999. – Вып. 49. – С. 24 –28.
12. Георгиева Л.В. Видовой состав и динамика фитоплана. В кн. под ред. Ковалёв А.В., Финанко З.З. Планктон Черного моря. – Киев: Наукова думка, 1993. – С. 205–207.
13. Миронов О.Г. Морская санитарная гидробиология / ИнБЮМ НАН Украины. – Севастополь, 1995. – 102 с.
14. Токарев Ю.Н., Евстигнеев П.В., Машукова О.В. Планктонные биOLUMиНесценты Мирового океана: видовое разнообразие, характеристики свETOизлучения в норме и при антропогенном воздействии. – Севастополь, Оріанда, 2016.
15. Лямина Н.В. Лямина А.Г. Экологическая оценка морских прибрежных экосистем по изменениям параметров биOLUMиНесценции / Системы контроля окружающей среды - 2016. Тезисы доклада

дов Международной научно-технической конференции. 2016. С. 201.

16. Лямина Н.В. Лямин А.Г., Рубцова С.И. Биолуминесценция Dinophyceae как индекс загрязнения морских прибрежных экосистем // Экобиологические проблемы Азово-Черноморского региона и комплексное управление биологическими ресурсами Материалы III научно-практической молодежной конференции. Под редакцией С.И. Рубцовой, Н.В. Ляминой. 2016. С. 158-163.
17. Лямин А.Г., Лямина Н.В. Аннотированный список биолуминесцентных Dinophyceae Чёрного моря // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017: сборник статей по материалам научно-практической конференции с международным участием «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017» (11 – 15 сентября 2017 г.) / под ред. Ю.А. Омельчук, Н.В. Ляминой, Г.В. Кучерик. – Севастополь: СевГУ, 2017. С. 801-810.
18. Tomas C.R. (Ed.) Identifying marine phytoplankton. Academic Press: San Diego. 1997.
19. Коновалова Г.В. Динофлагелляты (Dinophyta) дальневосточных морей России и сопредельных акваторий Тихого океана. Владивосток: Дальнаука. 1998. 300 с.
20. Matzenauer L. Die Dinoflagellaten des Indisches Ozeans. Botanisches Archiv 35. 1933.
21. Машукова О.В. Биолуминесценция черноморских гребневиков-вселенцев как тест их физиологического состояния: дис. на соискание учёной степени канд. биол. наук / Ольга Владимировна Машукова. Севастополь, 2011 – 183 с.
22. Seo K.S., Fritz L. Cell ultrastructural changes correlate with circadian rhythms in *Pyrocystis lunula* (Pyrophyta). J. Phycol. 36, 2000, P. 351-358.
23. Рибаров С., Беков Л., Бенчев И. Гемолитическое действие свинца в опытах *in vitro* // Фармакология и токсикология. – 1980. – 43, №5. – С. 620 – 622.
24. Уэбб Л. Ингибиторы ферментов и метаболизма // М.: Мир, 1966. – 350 с.

References

1. Kononov S.M. Anthropogenic impact and ecosystems of the Black Sea, CIESM Sci. Ser., 1. 1995. P. 53-83.
2. Rubtsova S.I., Lyamin A.G., Lyamina N.V., Puzakov M.V., Puzakova L.V. Development of scientific principles of integrated coastal zone management in Crimea. Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy [Environmental Management Systems], 2016. Vol. 4(24), P.135 -141. (in Russian).
3. Tokarev Yu.N. Fundamentals of biophysical ecology of aquatic organisms. Sevastopol: ECOS-Hydrophysics, 2006. 342 p. (in Russian).
4. Tokarev Yu.N., Evstigneev P.V., Vasilenko V.I., Mashukova O.V., (Burmistrova) Lyamina N.V. Bioluminescence of plankton organisms as an index

of the neritic aquatoria pollution. Proceedings of the Eighth Intern. Conf. on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 07, 13 – 17 November 2007, Alexandria, Egypt, Middle East Technical University, Ankara, Turkey. Vol. 2. P. 925- 936.

5. Narusevich T.F., Shayda V.G., Yevstigneyev P.V., Davydov V.V. Interrelation of plankton structure and bioluminescence as a method of biomonitoring of the Black Sea. Ekologiya i ratsional'noye ispol'zovaniye prirodnikh resursov yuzhnogo reëgiona Ukrainy [Ecology and rational use of natural resources of the southern region of Ukraine]. 1985. P. 273 -276. (in Russian).
6. Narusevich T.F., Tokarev Yu.N. Pytoplankton and a bioluminescence in Mediterranean sea during the summer period. Gidrobiologicheskii zhurnal [Gidrobiologicheskii Jurnal], 1989. Vol. 25, № 6. P. 10-16. (in Russian).
7. Shimomura O. Bioluminescence: Chemical Principles and Methods. World Scientific Publishing, Singapore. 2006.
8. Lyamina N.V. Dynamics of the bioluminescence field parameters in the Black Sea and their correlation with environment factors: Ph.D. thesis in Biological Science: spec. 03.02.10 "Hydrobiology", Sevastopol, 2014. 133 p. (in Russian).
9. Gitel'zon, I.I., Levin, L.A., Utyushev, R.N., Cherepanov, O.A., Chugunov Yu.V. Bioluminescence in the Ocean. 1992. 283 p. (in Russian).
10. Bitukov E.P., Yevstigneyev P.V., Tokarev Yu.N. Dinoflagellata Black Sea and influence on them of anthropogenous factors. Gidrobiologicheskii zhurnal [Gidrobiologicheskii Jurnal], 1993, Vol. 29. P. 27-34. (in Russian).
11. Bryantsev V.A., Bryantseva Yu.V. Long-term change in phytoplankton of the Black Sea deep-water part in connection with natural and anthropogenic factors. Ekologiya morya [Ecology of the Sea], 1999. Vol. 49. P. 24-28. (in Russian).
12. Georgieva L.V. Specific structure and phytocen dynamics., 1993. P. 205–207. (in Russian).
13. Mironov O.G. Marine Sanitary Hydrobiology. 1995. 102 p. (in Russian).
14. Tokarev Yu.N., Yevstigneyev P.V., Mashukova O.V. Plankton bioluminescents of the World Ocean: species diversity, characteristics of light emission under normal and anthropogenic effects. 2016. 339 p. (in Russian).
15. Lyamina N.V. Lyamin A.G. Ecological assessment of marine coastal ecosystems by changes in bioluminescence parameters. Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy – 2016. Tezisy докладov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Environmental Management Systems-2016. Abstracts of the International Scientific and Technical Conference]. 2016. P. 201. (in Russian).
16. Lyamina N.V. Lyamin A.G., Rubtsova S.I. Dinophyceae Bioluminescence as an Index of Pollution of Coastal Ecosystems. Ekobiologicheskii

- problemy Azovo-Chernomorskogo regiona i kompleksnoye upravleniye biologicheskimi resursami Materialy III nauchno-prakticheskoy molodezhnoy konferentsii. [Ecobiological problems of the Azov-Black Sea region and integrated management of biological resources Proceedings of the 3rd scientific and practical youth conference]. 2016. P. 158-163. (in Russian).
17. Lyamin A.G., Lyamina N.V. The annotated listing of the bioluminescent Dinophyceae of the Black Sea. Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost' – 2017: sbornik statey po materialam nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem «Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost' – 2017» [Environmental, Industrial and Energy Security – 2017 : a collection of articles on the materials of the scientific and practical conference with international participation “Environmental, Industrial and Energy Security – 2017”], Sevastopol: SevSU, 2017. P. 801-810. (in Russian).
 18. Tomas C.R. (Ed.) Identifying marine phytoplankton. Academic Press: San Diego. 1997.
 19. Kononova G.V. Dinoflagellates (Dinophyta) of the Far Eastern seas of Russia and adjacent waters of the Pacific Ocean. 1998. 300 p. (in Russian).
 20. Matzenauer L. Die Dinoflagellaten des Indisches Ozeans. Botanisches Archiv 35. 1933.
 21. Mashukova O.V. Bioluminescence of Black Sea ctenophores-invaders as a test of their physiological state: Ph.D. thesis in Biological Science: spec. 03.02.10 "Hydrobiology". 2011. 183 p. (in Russian).
 22. Seo K.S., Fritz L. Cell ultrastructural changes correlate with circadian rhythms in *Pyrocystis lunula* (Pyrrophyta). J. Phycol. 36, 2000, P. 351-358.
 23. Ribarov S., Bekov L., Benchev I. Hemolytic effect of lead in experiments *in vitro*. Farmakologiya i toksikologiya [Pharmacology and Toxicology], 1980. Vol. 43, №5. P. 620- 622. (in Russian).
 24. Uebbs L. Inhibitors of enzymes and metabolism. 1966. 350 p. (in Russian).

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал входит в национальную библиографическую базу данных РИНЦ.

В журнале публикуются результаты исследований по следующим направлениям:

- тепловые и ядерные энергетические установки;
- электротехнические комплексы и сети;
- нетрадиционные и возобновляемые источники энергии;
- экологическая безопасность;
- химические технологии атомных станций;
- информационные технологии в энергетике;
- моделирование физических процессов;
- физика в ядерной энергетике;
- автоматизация процессов контроля и управления;
- судовые энергетические установки;
- холодильные установки;
- гидравлические энергоустановки;
- компьютерная инженерия и техническая диагностика.

Принимаются статьи на русском и английском языках.

Статья должна быть структурирована и содержать:

- постановку проблемы, ее связь с актуальными научными или практическими заданиями;
- анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы;
- выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которой посвящается данная статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейших поисков в данном направлении.

К статье должно прилагаться:

- два экземпляра рукописи статьи, выполненной в соответствии с требованиями, первый экземпляр, подписанный всеми авторами;
- оригинал экспертного заключения о возможности опубликования данной работы в открытой печати;
- рецензия, подписанная доктором наук или кандидатом наук;
- информация об авторах статьи (заголовки статьи, фамилия, имя и отчество (полностью), должность, ученая степень, полный почтовый адрес, контактные телефоны и адреса электронной почты);
- компакт-диск с текстовым файлом.

ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЬИ

При подготовке статьи в журнал авторы должны руководствоваться стандартом «Оригиналы авторские и текстовые издательские» (ОСТ 29.115—88). К авторским оригиналам, передаваемым для издания, предъявляются следующие требования.

Статья должна содержать:

- шифр УДК; название статьи; инициалы и фамилии авторов;
- место работы каждого автора с полным почтовым адресом;
- аннотацию на русском языке (4-5 строк), отображающую цель проведенных исследований и основные результаты;
- ключевые слова;
- индекс UDC (УДК для англ. блока);
- заглавие (на английском языке);
- фамилии и инициалы авторов (на английском языке);

- место работы каждого автора с полным почтовым адресом (на английском);
- аннотация на английском языке с заголовком «Abstract»;
- ключевые слова (на английском языке, соответствующие русскоязычному набору);
- статья на языке оригинала;
- список литературных источников на русском языке (6-20 ссылок);
- список литературных источников на латинице: тот же список, что и в статье, но с транслитерацией фамилий и слов, записанных по-русски, и с переводом на английский язык неанглоязычных названий источников).

ОПИСАНИЕ МАКЕТА СТАТЬИ

Статья должна представляться также в электронном виде файлом, подготовленном в текстовом процессоре MS Word в режиме разметки страницы. Файл следует сохранять с расширением *.doc(или *.rtf) без макросов.

Имя файла должно начинаться фамилией контактирующего автора на латинице. Основной текст набирается шрифтом «Times New Roman» (11 пт) через интервал с автоматической расстановкой переносов в две колонки с расстоянием между ними 10 мм.

Ширины верхнего поля – 27 мм, нижнего – 23 мм, левого и правого – 18 мм, первый ряд — отступ 0,75 см.

Название статьи – шрифт 16 пт, ФИО – шрифт 14 пт. Сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, список литературы – шрифт 10 пт.

Рисунки выполняются в графических редакторах и (или) процессорах (Paint, PhotoShop, CorelDraw и т.п.) в с разрешением 300dip.

Шаблон статьи и требования по ее оформлению приведены на сайте СевГУ: <https://www.sevsu.ru/>.

Статьи, не удовлетворяющие шаблону и требованиям к оформлению, рассматриваться не будут.

Более детальную информацию можно получить в редакции журнала:

ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация. E-mail nauchnyyzhurnal@mail.ru, телефон. +7(8692) 71-01-64.

ISSN 2413-5526

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 5 № 3**

**SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 5 No 3**

Учредитель и издатель:

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

Адрес редколлегии:

ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация
E-mail nauchnyzhurnal@mail.ru
тел. +7(8692) 71-01-64.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнения, высказываемые авторами в публикуемых статьях, не всегда совпадают с мнением редакции. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Научный журнал «Энергетические установки и технологии» издается в авторской редакции.

Компьютерная верстка: *Е.А. Нестерова.*

Подписано к печати 30.09.2019. Изд. № 45/19. Зак. 43/19. Тираж 65 экз.
Объем 12,5 п.л. Усл. печ. л. 11,62. Уч.-изд. л. 12,25. Формат бумаги 60 x 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»