ISSN 2413-5526

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 4 № 2

Севастополь
2018

Э 651
УДК 621.311

ISSN 2413-5526

Э 651 **Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2018. – Т. 4. - № 2. – 132 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;
Тимощенко А.И., д.т.н., профессор; *Карницкий А.Б.*, д.т.н., профессор;
Высоцкий В.Е., д.т.н., профессор; *Краснодубец Л.А.*, д.т.н., профессор;
Прибатурин Н.А., д.т.н., профессор; *Кирияченко И.А.*, к.т.н., профессор;
Магдыч Е.А., к.т.н., доцент; *Федорова С.А.*, к.пед.н., доцент;
Мирошниченко С.Т., к.т.н., доцент; *Свириденко И.И.*, к.т.н., доцент;
Матузаев К.Б., к.т.н., доцент; *Скидан А.А.*, к.т.н., доцент;
Углов А.В., к.т.н., доцент; *Шайтор Н.М.*, к.т.н., доцент;
Ерофеев В.А., к.т.н., доцент; *Ожиганова М.И.*, к.т.н., доцент;
Гусева Е.В., к.т.н., доцент; *Щекатурина Т.Л.*, д.х.н., доцент

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

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

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

© Издание ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Автоматизация процессов контроля и управления 7

В.С. Жмерёв, В.А. Тяпкина, А.А. Чуклин. Повышение эффективности методик поверки средств измерительной техники 7

Н.И. Кузнецова, Ю.Г. Дикусар , В.А. Нурзай, Д.О. Скрыпник. Математическое описание объекта в практике моделирования 11

Электротехнические комплексы и системы **20**

Н.В. Берлад, О.М. Крастелёв. Исследование критерия втягивания ротора синхронного гребного электродвигателя в синхронизм 20

Н.В. Берлад, В.В. Смирнов. Особенности работы и регулирования напряжения асинхронных генераторов в специальных автономных системах электроснабжения 24

А.И. Кавун , И.А. Кочетов, В.В. Смирнов. Анализ возможности использования атмосферного электричества 28

Н.А. Куликова, О.Н. Титаренко, В.А. Тяпкина. Резистивное заземление нейтрали – способ повышения надежности работы электрических сетей 6-35 кВ 32

Ю.А. Майорова, А.К. Пронина, К.П. Путилин. Моделирование дизель-генераторной установки с турбонаддувом двигателем постоянного тока 39

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии **45**

Л.Н. Канов, А.В. Солодкий, А.А. Пронин. Повышение эффективности городского электротранспорта на основе использования энергии рекуперации 45

В.В. Кувшинов, Н.В. Морозова, В.В. Смирнов, Д.В. Чунин, В.В. Решетняк. Увеличение эффективности работы солнечных элементов модификацией их поверхности наночастицами серебра 52

Химические технологии атомных станций **57**

А.М. Акимов, С.А. Котельникова. Условия подготовки исходной воды для обработки на баромембранных установках 57

В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина, Э.А. Культенко. Природа функциональных групп после механической обработки растительных отходов и их взаимодействие с вредными компонентами в водной среде 62

С.А.Федорова, Е.А. Табацкая. Математическое описание изменения β - активности модельных растворов при использовании нанопорошка диоксида кремния в присутствии нитрит-ионов и сульфат-ионов 70

С.А.Федорова, И.В.Шумар. Корреляционный анализ глубоководного сброса после очистных систем г. Ялты 77

М. А. Фролова, П. А. Пономаренко, Н. Н. Ленивенко, И. Г. Тананаев, В. А. Собина. К вопросу перспектив энергетики и анализ некоторых экологических проблем 85

Н.И. Черкашина, А.О. Литвинова. Разработка перспективных комбинаций сорбционных смесей для очистки сточных вод от анионов 89

Н.И. Черкашина, А.О. Литвинова. Определение оптимальных комбина-

ций сорбционных для удаления ионов свинца и меди из жидких технологических сред 95

Н.И. Черкашина, А.В. Любушкина. Разработка перспективных сорбентов на основе органического сырья для извлечения тяжелых металлов 103

Н.И. Черкашина, А.В.Любушкина, А.О.Литвинова. Конкурентная сорбция лигниновых препаратов для очистки сточных вод 109

И.Б. Широков, И.И. Марончук. Разработка СВЧ метода высокоточного измерения процентного содержания воды в водонефтяной смеси 115

И. Б. Широков, Н.И. Черкашина, И.И. Марончук. Разработка элементов конструкции измерителя влаги в нефти и нефтепродуктах на основе СВЧ метода 121

CONTENTS

Process automation and control 7

V. S. Zhmerev, A. V. Tyapkina, A. A. Chuklin. Improving the efficiency of methods of verification of measuring equipment 7

N.I. Kuznetsova, Ju.G. Dikusar , V.A. Nurzai, D.O. Skrypnik. Mathematical description of the object in modeling practice 11

Electrotechnical complexes and systems **20**

N.V. Berlad, O.M. Krastelev. The study criterion of retraction of the rotor of the synchronous propeller of the motor in synchronism 20

N.V.Berlad, V.V.Smirnov. Features of operation and voltage regulationasynchronous generators in specialautonomous power supply systems 24

A.I. Kavun, I.A. Kochetov, V.V. Smirnov. Analysis of the possibilities of using atmospheric electricity 28

N.A. Kulikova, O.N. Titarenko, V.A. Tyapkina. Resistive grounding of the neutral is a way to increase the reliability of 6-35 kV electrical networks 32

J.A. Mayorova, A.K. Pronina, K.P. Putilin. Simulation of turbocharged diesel generator setby direct current motor 39

Alternative and renewable energy sources **45**

L.N. Kanov, A.V. Solodkiy, A.A. Pronin. Increase of Efficiency of City Electrotransporton the Basis of the Use of Recuperation energy 45

V.V. Kuvshjnov, N.V. Morozova, V.V. Smirnov, D.V. Chunin, V.V. Reshetnyk. Increase the efficiency of solar cells by modifying their surface with silver nanoparticles 52

Chemical technology of nuclear power plants **57**

A.M. Akimov, S.A. Kotelnikova. Conditions of preparation of raw water for treatment for baromembrane in installations 57

V.A. Erofeev, N.I. Cherkashina, E. A. Kultenko. The nature of the functional groups after mechanochemical processing of plant waster and their interaction with the aquatic environment 62

S.A. Fedorova, A.A. Tabatskaya. Mathematical description of the β-activity variation of model solutions using nanopowder silicon dioxide in the presence of nitrite ions and sulfate ions 70

S.A. Fedorova, I.V.Shumar. Correlation analysis of deep-water discharge after treatment systems in Yalta 77

M. A. Frolova, P. A. Ponomarenko, N. N. Lenivenko, I. G. Tananaev, V. A. Sobina. On the issue of energy prospects and analysis of some environmental problems 85

N.I. Cherkashina, A.O. Litvinova. The development of promising combinations of sorption of compounds for the treatment of waste waters from anions 89

N.I. Cherkashina, A.O. Litvinova. The determination of optimal combinations of sorption for the removal of lead ions and copper from liquid process media 95

N.I. Cherkashina, A. V. Lyubushkina. Development of perspective sorbents on the basis of organic raw materials for extraction of heavy metals 103
N.I. Cherkashina, A.V. Lyubushkina, A. O. Litvinova. Competitive sorption ligninov drugs for the treatment of wastewater 109
I.B. Shirokov, I.I. Maronchuk. Development of the microwave method for the high-precision measurement of the percentage of water in a water-oil mixture 115
I.B. Shirokov, N.I. Cherkashina, I.I. Maronchuk. Development of the elements of the moisture meter in oil and oil products based on the microwave method 121

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК. 006.91

Повышение эффективности методик поверки средств измерительной техники

[1]В.С. Жмерёв, [2]В.А. Тяпкина, [3]А.А. Чуклин

[1,2,3]ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.
[2]valya_tyapkina@mail.ru, [3]chuklin53@mail.ru

Статья поступила 05.04.2018 г.; после доработки 08.04.2018 г.

Аннотация

В статье рассматривается задача повышения эффективности процедур поверки средств измерений (СИ). В качестве показателя эффективности предлагается использовать вероятность метрологического отказа на межповерочном интервале. Рассматривается путь минимизации вероятности метрологического отказа за счет модернизации процедур поверки, направленной на более полное использования данных, получаемых в процедурах поверки.

Ключевые слова: методика поверки, средства измерительной техники, производственные процессы

Improving the efficiency of methods of verification of measuring equipment

[1]V. S. Zhmerev, [2]A. V. Tyapkina, [3]A. A. Chuklin

[1,2,3]FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[2]valya_tyapkina@mail.ru, [3]chuklin53@mail.ru

Received 05.04.2018 y.; received in final form 08.04.2018 y.

Abstract

The article deals with the problem of improving the efficiency of verification of measuring instruments (MI). It is proposed to use the probability of metrological failure at the inter-calibration interval as an indicator of efficiency. The way of minimization of probability of metrological failure due to modernization of verification procedures aimed at more complete use of data obtained in verification procedures is considered.

Keywords: methods of calibration, measuring instruments, production processes

Введение

Повышение качества продукции и производственных процессов всех отраслей народного хозяйства приобретает все большую актуальность. При этом одним из важных компонентов показателя качества является экономический, выражающийся часто в зависимости от ситуации в виде финансовых затрат или потерь в процессе производства.

Важную роль в обеспечении качества играют процессы измерений.

Эффективность процесса измерений обеспечивается путем решения двух основных задач:

1. Выбор средства измерения (СИ) необходи-

мого класса точности. Эта задача решается однократно на этапе создания или модернизации производственного процесса;

2. Поддержание требуемой точности измерений на протяжении всего периода эксплуатации конкретного СИ путем реализации процедур поверки (калибровки). В этих процедурах формируются данные, характеризующие точность СИ в момент поверки, и принимается решение о возможности дальнейшего использования СИ.

Последняя задача решается многократно, однако, в существующих методиках поверки решения принимаются на основе лишь тех данных, которые характеризуют свойства СИ в текущий момент времени.

По сути, в действующих процедурах поверки устанавливается лишь факт отказа СИ, что недостаточно для полной характеристики качества измерительного процесса.

Поэтому представляет интерес поиск путей совершенствования процедур поверки таким образом, чтобы результаты поверки более полно оценивали качество измерительного процесса за счет всей информации, формируемой при поверках.

Пути повышения эффективности процедур поверки СИ

Первым шагом в решении задачи повышения качества измерительного процесса является выбор показателя качества.

Этот показатель должен зависеть от времени, поскольку свойства СИ, влияющие на качество процесса измерения, с течением времени ухудшаются (контроль изменения свойств СИ как раз и обеспечивает процедура поверки).

В существующих процедурах поверки в качестве показателей эффективности используют вероятности ошибок первого и второго рода (вероятности признания работоспособным неисправный измерительный прибор и неработоспособным работоспособный) [1].

Эти показатели зависят от параметров процесса получения результатов эксперимента (количества точек диапазона, количества измерений и др.) в процессе поверки и остаются неизменными для любого момента времени проведения поверки.

По сути, такие показатели характеризуют качество оценки работоспособности прибора в момент поверки и очень слабо отражают качество измерительного процесса.

В идеальной ситуации качественный измерительный процесс характеризуется условием:

$$\Delta_{max}(t) < \Delta_{доп}, \quad (1)$$

где $\Delta_{max}(t)$ - максимальное значение погрешности измерения СИ, применяемого в измерительном процессе для $0 < t < T_э$;

$T_э$ - время эксплуатации СИ;

$\Delta_{доп}$ – максимальное допустимое значение погрешности, соответствующее классу точности СИ, используемого в измерительном процессе.

Нарушение условия (1) в процессе измерений называют метрологическим отказом. Метрологический отказ возникает под влиянием множества неконтролируемых факторов и является случайным событием, вероятность которого $p_{мп}$ на межповерочном интервале целесообразно использовать в качестве показателя эффективности процесса измерений.

Существующие методики поверки СИ позволяют обнаружить факт метрологического отказа, возникшего на предшествующем межповерочном интервале, и исключить на этом основании СИ из дальнейшего использования, но не оценивают вероятность $p_{мп}$ возникновения метрологического отказа на следующем после поверки межповерочном интервале для СИ, допущенных к использованию.

Вероятность метрологического отказа вообще не рассматривается при поверке [1]. Однако значение вероятности $p_{мп}$ можно оценить, если использовать данные экспериментов не только текущей поверки, но и данные предшествующих поверок.

Возможный способ оценки значения вероятности $p_{мп}$ иллюстрирует рис.1.

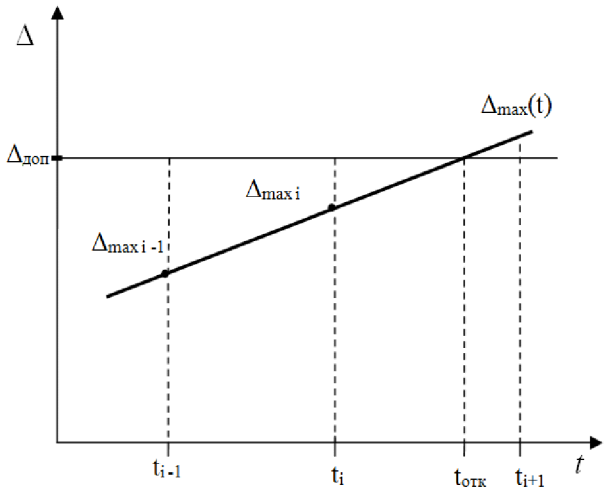


Рис.1. Оценка значения $p_{мп}$ по результатам двух смежных поверок.

Оценка значения $p_{мп}$ на интервале $[t_i, t_{i+1}]$ определяется точкой $t_{отк}$ пересечения на этом интервале линий $\Delta = \Delta_{max}(t)$ и $\Delta = \Delta_{доп}$. Эта точка соответствует моменту возникновения метрологического отказа. При этом положение линии $\Delta = \Delta_{max}(t)$ определяется оценками максимальной погрешности измерения, полученными при поверках в моменты t_i, t_{i-1} - Δ_{maxi} и $\Delta_{max\ i-1}$. Значение оценки определяется выражением

$$p_{мп} = (t_{i+1} - t_{отк}) / (t_{i+1} - t_i). \quad (2)$$

Использование значения $p_{мп}$ в качестве показателя эффективности измерительного процесса, позволяет решать задачу его оптимизации. Условие оптимальности измерительного процесса в этом случае формулируется следующим образом:

$$p_{мп} = \min. \quad (3)$$

Из (2) следует, что для достижения оптимума необходимо изменить величину очередного межповерочного интервала, сделав его равным $t_{отк} - t_i$.

При таком подходе, процедура поверки перестает быть средством выявления неисправных СИ, а становиться эффективным средством управления качеством измерительного процесса.

Основные задачи повышения эффективности процедур поверки

Эффективность предлагаемого пути совершенствования процедуры поверки определяется достоверностью оценки значения $p_{мп}$, которая зависит от многих факторов:

- количества точек диапазона измерения СИ и способа их определения,
- количества измерений в выбранных точках;
- способа оценки Δ_{max} в текущей поверке;
- выбор количества поверок, результаты которых используются для построения зависимости $\Delta_{max}(t)$;
- способ формирования зависимости $\Delta_{max}(t)$ и др.

Аналитическое определение зависимости оценки $p_{мп}$ от перечисленных выше факторов представляется сложной задачей.

Поэтому, для оценки его значения целесообразно использовать методы имитационного моделирования [2].

В основе имитационной модели лежит модель СИ, общий вид которой

$$Y(t)=X(t)+\Delta_{ad}(t)+\Delta_{mult}(X(t),t)+\Delta_{nl}(t)+\varepsilon(t), \quad (4)$$

где $Y(t)$ – показания СИ в момент времени t, отсчитываемый от начала моделирования;

$X(t)$ – значение измеряемой величины;

$\Delta_{ad}(t)$ – аддитивная составляющая погрешности СИ;

$\Delta_{mult}(X(t),t)$ – мультипликативная составляющая погрешности;

$\Delta_{nl}(t)$ – нелинейная составляющая погрешности;

$\varepsilon(t)$ – случайная составляющая погрешности, представляющая собой центрированную случайную величину с нормальным законом распределения и среднеквадратическим отклонением $\sigma(t)$, изменяющимся во времени.

В имитационной модели (ИМ) на множестве моделей (4) СИ определенного класса многократно реализуются два процесса:

- моделирование процесса поверки по методике, эффективность которой оценивается. При этом на каждом шаге формируется оценка $p_{мп}$;
- моделирование процесса функционирования СИ на межповерочном интервале, в ходе которого выявляются метрологические отказы и оценивается эмпирическая оценка вероятности метрологического отказа $p_{мпэ}$.

По результатам реализации указанных двух процессов и определяется величина

$$\Delta p = p_{мпэ} - p_{мп}, \quad (5)$$

которая характеризует эффективность процедуры поверки при выбранных влияющих факторах.

Для этой величины в процессе моделирования формируется эмпирическое распределение (гистограмма) $f(\Delta p)$, параметры которого (среднее значение Δp, среднее квадратическое отклонение и др.) могут являться обобщенными показателями эффективности процедуры поверки.

Применение имитационного моделирования жизненного цикла СИ позволяет:

1. оценить эффективность методики поверки, используемой для обеспечения эффективности измерительного процесса;
2. определить оптимальные параметры процедуры поверки (объем измерений, количество точек диапазона).

Заключение

Суммируя сказанное, можно утверждать, что совершенствование процедуры поверки может быть выполнено:

- на основе введения показателя $p_{мп}$, отражающего влияние результатов поверки на эффективность измерительного процесса;

- за счет использования в поверке данных о

свойствах конкретного СИ на всем предшествующем поверке периоду его эксплуатации.

Реализация усовершенствованной методики поверки требует использования CALS-технологий (информационной поддержки жизненного цикла продукции), которые все шире применяются в различных областях производства [3]. Задачей этой технологии является накопление, сохранение экспериментальных данных о конкретном СИ и обеспечение их использования для повышения эффективности измерительного процесса с использованием конкретного СИ.

Список литературы

1. Артемьев Б.Г., Голубев С.М. Справочное пособие для работников метрологических служб: В 2-х кн./ Предисл. канд. тех. наук И.Х. Сологяна, - 3-е изд., Перераб. и доп.- М.: Изд-во стандартов, 1990. – кн.1. С.428, ил.
2. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука. - М.: «Мир», 1978. – 418 с., ил.
3. Норенков И.П., Кузьмик П.К. Информационная поддержка наукоемких изделий (CALS-технологии). М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 320 с.

References

1. Artemyev, B. G., Golubev S. M. Reference manual for employees of metrological services: In 2 books/ Foreword by candidate of technical Sciences I. H. Cologan, - 3rd ed., Revised and enlarged - M.: Publishing house of standards, 1990. - Book 1. P.428, ill.
2. Shannon R. Simulation modeling of systems-art and science. - Moscow: Mir, 1978. - 418 p., ill.
3. Norenkov I. P., Kuzmik P. K. Information support of science-intensive products (CALS-technologies). M.: Publishing house of MSTU named after N. Uh. Bauman, 2002. - 320 p.

УДК 004.94

Математическое описание объекта в практике моделирования

Н.И. Кузнецова[1], Ю.Г. Дикусар[2], В.А. Нурзай[3], Д.О. Скрыпник[4]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская,33,
г. Севастополь, 299053, Россия. [1]nika100452@gmail.com, [3]Mengsk777@yandex.ru, [4]deni_rossa.skr@mail.ru

Статья поступила 10.04.2018 г.; после доработки 14.04. 2018 г.

Аннотация

Выполнено исследование математического описания объекта и предложен подход к методам постановки математических задач, возникающих в реальных практических ситуациях. Рассмотрена необходимость создавать модели изучаемых процессов, проводить их анализ и определять пути их дальнейшего использования при эксплуатации объекта. Построение и исследование математических моделей с целью решения поставленных научных задач и составляет предмет математического моделирования.

Ключевые слова: объект, свойства, этапы моделирования, математическая модель.

Mathematical description of the object in modeling practice

N.I. Kuznetsova[1], Ju.G. Dikusar[2], V.A. Nurzai[3], D.O. Skrypnik[4]
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
[1]nika100452@gmail.com, [3]Mengsk777@yandex.ru, [4]deni_rossa.skr@mail.ru

Received 10.04.2018 y.; received in final form 14.04.2018 y.

Abstract

A study of the mathematical description of the object is performed and an approach is proposed to the methods of setting mathematical problems that arise in real practical situations. The necessity to create models of the studied processes, to analyze them and to determine the ways of their further use during operation of the facility is considered. The construction and research of mathematical models for the purpose of solving the assigned scientific problems is the subject of mathematical modeling.

Keywords: object, properties, stages of modeling, mathematical model.

Введение

При эксплуатации сложного оборудования на АЭС возникают такие ситуации, когда обслуживающий персонал должен быть обучен методам их решения в короткий интервал времени во избежание тяжелых последствий для персонала и оборудования.

При профессиональной подготовке современного специалиста необходимо уделять внимание методам постановки математических задач, возникающих в реальных практических ситуациях. Такие математически корректно поставленные задачи, адекватно решаемой проблеме отображающие исследуемые системы, принято называть математическими моделями или объектами.

Математическое моделирование дает возможность получить ответы на поставленные при разработке и анализе математических моделей вопросы, если модели строятся с учетом объекта и возникшей ситуации, а так же позволяют прогнозировать поведение сложных систем при их дальнейшей эксплуатации.

Моделирование – это исследование слож-

ных технологических процессов на их моделях, построение и изучение моделей реально существующих объектов и только конструируемых, предполагаемых [1].

Конечно, на современном этапе развития производства, можно выполнять различные экспериментальные исследования, для решения поставленных задач, но используя методы математического моделирования эти задачи можно решать очень быстро, в особенности используя цифровые и компьютерные технологии, что так же позволяет избегая значительных экономических затрат, изменять в широком диапазоне параметры, характеристики, свойства исследуемой системы.

Развитие компьютерных технологий в настоящее время позволяет решать математические задачи при аналитических методах сложных систем, а также выполнять анализ результатов исследования, получая их количественную оценку.

Диапазон применения математических моделей во всех область науки и производства огромен, поэтому в пределах одной статьи возможно осветить лишь часть проблем и аспектов моделирования объекта. Объекты или системы могут быть различной степени сложности и при их моделировании не всегда используются все функциональные связи этих объектов, что может отразиться на поведении модели, и она становится довольно грубой.

Для эффективной эксплуатации оборудования возникает необходимость моделировать и изучать технологический процесс, а его модель должна иметь с исходным процессом свойства их объединяющие.

Задачи, которые решаются с помощью математического моделирования, могут быть очень разнообразны и многоплановы, поэтому часто возникает необходимость изменения или отказа от предположений или допущений принятых в исходных данных, если нельзя однозначно выделить превалирующие отношения.

Постановка цели научной работы

Целью данной научной работы является исследование математического описания объекта, на основе которого предложен подход к методам постановки математических задач, возникающих в реальных практических ситуациях.

Для реализации поставленной цели решены следующие задачи:

1. описаны модели и их свойства в практике моделирования;
2. выполнен анализ основных требований, предъявляемых к моделям;
3. рассмотрены основные этапы моделирования объекта в реальных практических ситуациях.

Модели и их общие свойства в практике моделирования

Модель – объект или процесс любой природы, который способен заменить изучаемый в интересующих исследователя свойствах.

Большое разнообразие материальных или идеальных объектов может быть охвачено понятием модель, но объединяет эти объекты априорная и апостериорная информация о них. Все модели, которые используются в науке или производстве, должны содержать информацию об исходном базовом объекте и эта информация должна быть важна для решаемой задачи или исследования [2]. Все сведения об исследуемом объекте или технологическом процессе формируют описание объекта, которое необходимо для проведения исследования.

Рассмотрим задачу, когда есть конкретный объект или система и необходимо провести интересующие нас исследования или анализ, на практике это не всегда возможно, в связи с постоянным ростом сложности систем. Объект не всегда доступен из-за сложных условий эксплуатации, как например, на АЭС, что не позволяет выполнить натурный эксперимент. В ряде же случаев мы вообще не имеем возможности наблюдать систему в интересующем нас состоянии. Например, разбор аварии на таком сложном техническом объекте, как АЭС или сбой в работе оборудования АСУ ТП, приходится вести по ее протокольному описанию акта аварии. Кроме того эксперимент на реальном объекте часто становиться дорогим, трудоемким и длительным, поэтому модель и работа с ней предпочтительнее с любой позиции. Особенно это свойственно специалистам по современной электронной технике, поэтому они изучают большинство типов оборудования по литературе, и только часть из них опробуют на практике. В этих примерах доступна лишь модель, но это не мешает эффективно познавать любой объект или систему.

При разработке модели любого объекта, системы или технологического процесса, мы практически всегда применяем упрощения, что естественно огрубляет понятие о реальном объекте, но использование модели всегда значительно экономичнее, чем рассмотрение самой

системы или процесса.

Очень сложно выделить на реальном объекте, те свойства, которые являются наиболее важными и характерными для рассмотрения на модели. Специалистами разработано очень много замечательных моделей в различных областях науки и техники, но, не смотря на это на современном этапе моделирования велико количество объектов или процессов, для которых нет удовлетворительного описания.

Любая модель - специфический объект, который создается с целью получения или хранения информации о реальном исходном объекте для того, чтобы отразить свойства, характеристики, функции и связи, важные для задачи решаемой специалистом [3].

Согласно данному определению можно выделить общие свойства различных моделей, которые необходимо учитывать при моделировании, а именно:

- модель представляет собой конструкцию, которая содержит четыре компонента, а именно субъект; задача, решаемая субъектом; объект-оригинал и язык описания или способ воспроизведения модели. Самым важным компонентом этой конструкции является задача, решаемая субъектом, без которой нет смысла заниматься моделированием.
- для любого реального объекта, возможно множество в равной степени сходных, но различных по сути моделей, связанных с разными требованиями и задачами.
- множество различных моделей также соответствует паре задача и объект, которые содержат одинаковую информацию, но при этом она может различаться формой ее представления или воспроизведения.
- модель никогда не соответствует полностью исходному объекту и всегда является только приближенной копией оригинала, что делает модель обедненной в информационном плане.
- исходные объекты по своей природе могут быть различными в материальном или информационном плане. Они также сочетают разнородные материальные и информационные компоненты, но всегда независимо от объекта и решаемой задачи моделью будет информационное образование.
- в практике научного теоретического моделирования имеет место n-кратное моделирование, которое базируется на ранее разработанном идеальном объекте или модели. Это теоретическое моделирование, которое позволяет полученные результаты сравнить с данными эксперимента, что свойственно естественным наукам. Иногда вторичная модель содержит эмпирическую информацию, которую не охватывают в теоретическом отношении научные дисциплины.

Современное разнообразие математических моделей требует от нас необходимости разработать их классификацию с целью анализа и формирования типичных признаков для каждой модели.

При разработке классификации моделей можно применять различные признаки, но формально классификация основана на часто используемых математических средствах. Очень удобно использовать метод деления на две взаимоисключающие части по наличию какого-то признака или его отсутствию. Проанализируем наборы дихотомий, в практике моделирования при математическом описании объекта.

Например, рассмотрим модели по характеру или типу решаемых проблем. По этому критерию модели могут быть разделены на функциональные и структурные.

Функциональные модели содержат величины характерные для процесса или объекта и выражаются количественно, причем одни из них рассматриваются как независимые переменные, а другие - как функции от этих величин. Количественные зависимости между анализируемыми величинами в функциональных моделях могут быть представлены дифференциальными, алгебраическими и другими системами уравнений.

Для сложного объекта, состоящего из отдельных структурных составляющих, которые имеют между собой связи, не измеряющиеся количественно, разрабатывают структурную модель.

Для построения таких моделей используют теорию графов. Граф – это математический объект, представляющий собой некоторое множество точек (вершин) на плоскости или в пространстве, некоторые из которых соединены линиями (ребрами).

Далее рассмотрим модели по характеру исходных данных и результатов предсказания и разделим на детерминированные и стохастические [4].

В детерминированных моделях установлено взаимно-однозначное соответствие между всеми переменными описывающими объект или процесс и дают определенные предсказания, так как моделирование основано на знании меха-

низма функционирования объектов.

Очень часто в практике моделирования рассматривают сложные объекты, и процесс понимания функционирования оригинала оказывается трудоемким и продолжительным. В этой ситуации применяют следующий метод для создания модели.

На исходном объекте проводят ряд экспериментов, и полученные результаты анализируют с помощью методов математической статистики и теории вероятности, не занимаясь теорией моделируемого объекта, но при этом необходимо установить связи между переменными, описывающими объект.

Этот метод позволяет создать стохастическую модель. Необходимо отметить, что связи между переменными, описывающие объект или процесс имеют случайный характер из-за огромного количества и сочетания факторов, воздействующих на объект.

Одним из часто применяемых классификационных признаков является деление по характеру режимов и модели по этому признаку бывают статическими и динамическими.

Статическая модель содержит описание связей между основными переменными моделируемого объекта в установившемся режиме и не учитывает изменение параметров во времени.

Динамическая модель описывает связи между основными переменными моделируемого объекта при переходе от одного режима к другому. Кроме того математическое моделирование рассматривает модели дискретные, непрерывные, а также комбинированные или смешанного типа.

В дискретных моделях переменные принимают изолированные значения, а в непрерывных переменные принимают значения из некоторого интервала.

Большой интерес в практике математического моделирования представляют модели, где

все функции и отношения, по-разному зависят от переменных.

Линейные модели - все функции и отношения, описывающие модель линейно зависят от переменных и соответственно нелинейные в противном случае.

Любая математическая модель может характеризоваться следующими признаками:

- принадлежностью к определённому классу задач;
- указанием класса объектов моделирования;
- формой представления и обработки информации, т.е. способом реализации.

Учитывая постановку цели и задачи научного исследования математического описания объекта, рассмотрим более подробно последний вид классификации, то есть по способу реализации. Все модели по форме представления и обработки информации модели делятся на материальные и идеальные.

Материальные модели могут быть следующих видов [5]:

- сооружения (макеты, муляжи), которые воспроизводят пространственно геометрические характеристики исходных объектов, причем с соблюдением масштаба;
- модели, которые воспроизводят с соблюдением масштаба характеристики и свойства исходных объектов в пространстве и времени, причем модель прямого подобия должна быть выполнена из того материала, что и оригинал;
- приборные (аналоговые), которые воспроизводят анализируемые свойства и характеристики исходного объекта на основе системы прямого подобия, как например электронные аналоговые модели.

Следует заметить, что при аналоговом моделировании свойства и характеристики исходного объекта воспроизводятся с помощью модели иной, чем у оригинала физической природы.

Аналогичными по структуре математическими выражениями можно описать различные объекты и процессы, причем различные по своей природе, объекты можно рассматривать как пару моделей, которые с точностью до свойств, учитываемых в математическом описании, взаимно отображают друг друга, причем коэффициенты, связывающие сходные параметры, являются в этом случае размерными величинами.

Например, различные физические процессы описаны сходными аналитическими зависимостями [6]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{RC} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (3)$$

где: (1) - уравнение теплопроводности (закон Фурье), (2) - уравнение диффузии (закон Фика), (3) - уравнение электропроводности (закон Ома).

Рассмотрим идеальные модели, которые соответственно могут быть следующих видов:

1. неформализованные модели, т.е. системы представлений об исходном объекте, мысленно сложившиеся у человека;

2. частично формализованные, подразделяющиеся на:
- вербальные – описание свойств и характеристик исходного объекта представлены в виде текстовых материалов проектной документации или словесного описания результатов технического эксперимента;
- графические иконические – образы, свойства и характеристики исходного объекта, реально или теоретически доступные непосредственно зрительному восприятию в виде художественной графики или технологических карт;
- графические условные – данные статистических наблюдений и экспериментальных исследований в виде графиков, диаграмм, схем;
3. четко формализованные (математические) модели.

Математические модели отличаются от других типов моделей своей глубокой вариативностью, когда одно аналитическое выражение может описать большое число различных вариантов поведения сложных систем. Известно, что линейные дифференциальные уравнения с постоянными коэффициентами описывают и движение массы буйкового уровнемера, и изменение тока в колебательном контуре, и измерительную схему системы автоматического регулирования, и ряд других технологических процессов. Причем, следует заметить, что все эти аналитические выражения в любом виде соответствуют огромному числу комбинаций конкретных значений параметров. Например, для процесса механических колебаний и деформации - это любые значения массы и жесткости пружины.

Знаковые модели являются высшей ступенью математического описания реального исходного объекта, так как кратко записаны и позволяют изучать свойства в форме, не привязанной к конкретному содержанию, что является удобством работы.

На основании выше сказанного, рекомендуем применять знаковые модели, как наилучшую форму моделирования.

Деление моделей по различным признакам в определенной степени всегда условно, так как существуют модели, использующие и вербальные и знаковые построения, т.е. смешанные модели.

Проанализируем основные свойства любой модели такие как:
- упрощенность или аскетичность - модель отображает только наиболее важные стороны объекта;
- приблизительность – реальная действительность процесса или объекта отображается моделью грубо или в некотором приближении;
- адекватность - модель наиболее полно и успешно описывает моделируемую систему;
- конечность - модель отображает исходный объект только в итоговом конечном числе его отношений и, кроме того, возможности моделирования конечны;
- информативность - модель содержит информацию о процессе или исходном объекте, в границах гипотез, принятых при построении модели.

Необходимо разработать и выполнить анализ основных этапов построения модели при математическом описании объекта в практике осознанного моделирования.

На первом этапе такого моделирования при построении модели любого исходного объекта необходимо сформулировать цель исследования или решаемой технической задачи, для которой необходимо разработать модель. Этот этап основан на глубоком анализе исходной проблемы. Для этого необходимо собрать наиболее полную априорную информацию об объекте или процессе и выполнить анализ этих данных.

Второй этап моделирования требует определения границ исходного объекта подлежащего модельному описанию и исследованию с целью решения поставленной задачи. Исходных данных для различных ситуаций много, так как характер решаемой задачи, ее сложность и изученность имеет широкий диапазон.

Допустим, что на основании априорной информации об объекте, примем гипотезу о границах объекта, подлежащего модельному исследованию. В реальном мире все процессы и объекты взаимодействуют и являются взаимозависимыми. Можно утверждать, что на любой объект воздействует окружающая среда, но при этом и он воздействует на эту среду. Следовательно, входными воздействиями (возмущениями) будут связи среда – объект и наоборот выходными объект-среда.

При математическом моделировании исходного объекта необходимо наиболее полно рассматривать все взаимодействия этого объекта со средой, частью которой он является, иначе выделение его из системы (среды) будет неправоверным. Все важные связи должны быть исследованы, иначе исходная реальная система и ее модель будут иметь состояние и свойства не соответствующие друг другу, а значит, модель

окажется неполной неадекватной. При этом необходимо знать, чем больше связей будет учитывать модель, тем сложнее она получится, а это тоже является серьезным недостатком.

Очень важным, при построении любой модели, является учет значимых важных воздействий и исключение несущественных, что не только устранит вышеуказанное противоречие, но и повлияет на полноту, качество и эффективность модели. При моделировании необходимо глубоко понимать смысл решаемой технической задачи и скрупулезно изучать в модели воспроизводимость реальной базовой системы, что возможно при наличии большого опыта и индивидуальных творческих способностей. Реальные системы имеют материальные факторы, которые отражают связи различного происхождения, а именно: пространственные перемещения, потоки энергии, потоки информации и другие. В моделируемом объекте они должны быть обязательно отражены, исследованы и проанализированы.

Исследование должно быть полным как в качественном, так и в количественном отношении. Анализ необходимо основывать на разностороннем сравнении свойств и характеристик системы и модели, после чего можно утверждать статус разрабатываемой модели.

Требования, предъявляемые к моделям

Применение математических моделей в широком смысле не связано с материальным воспроизведением объекта, обладающего заданными свойствами и характеристиками, которые планируется исследовать. Так же не предполагается экспериментальных процедур. Формализованный объект представляется определенной математической структурой, состоящей из набора уравнений (дифференциальных или в конечных разностях) либо передаточной функцией, графом. Данный набор обладает определенными параметрами, а сам процесс исследования (решение математической модели) состоит в применении ко всей структуре последовательности математических операций и преобразований в соответствии с заранее проработанным алгоритмом. В качестве результата процесса вычислений появляется новая информация о моделируемом объекте, конечно лишь, в той части свойств, которые были отображены в разработанном математическом описании. Возможности современных вычислительных машин и программных продуктов позволяют исследовать эти свойства с разнообразными комбинациями параметров, составляющих исходную модель и определять присущие ей статистические характеристики, искать диапазоны параметров, оптимальных по различным критериям и решать множество смежных задач.

Под словами «модельное описание» понимается математически формализованное описание некоторого объекта или явления в терминах определяющих конкретные группы его характеристик. Математическая модель сложных процессов под непрерывным управлением содержит множество величин различной природы.

Все эти величины по формальным признакам подразделяются на три группы [7]:

- к первой группе относятся искомые неизвестные величины, подлежащие нахождению, они носят название эндогенные (внутренние), или фазовые;
- во вторую группу входят величины внешних возмущающих воздействий, так же называемых экзогенными или внешними; их величины известны и в модели задаются заранее в допустимых пределах;
- в третью группу входят величины воздействия на систему, задаваемые органами управления, с их помощью осуществляется непосредственное воздействие системы на рабочий процесс.

Внутри модели все эти группы величин связаны между собой и определяют ее работу во всех режимах. Вводится понятие замкнутой модели, в ней при заранее известных экзогенных воздействиях, величинах управления, начальных и граничных условиях однозначно определяются эндогенные величины на заданном отрезке времени.

Разделение на внешние и внутренние воздействия на модель можно произвести различными способами, такое разделение является условным и напрямую связано с целями моделирования и способом применения модели.

Следует привести основные требования, предъявляемые к моделям:

- универсальность – является мерой полноты отображения изучаемых свойств моделируемого объекта. Зачастую определяется числом и значимостью учитываемых в модели внешних и выходных влияющих воздействий;
- адекватность – это способность модели отражать нужные свойства объекта с определенной погрешностью. Адекватность определяет возможность с помощью модели достичь поставленной цели исследования в соответствии с заданными критериями.

Адекватная модель должна быть в достаточной мере полной, точной и истинной, для достижения поставленной цели. В некоторых случаях вводится сравнительная мера адекватности модели, то есть различные модели сравниваются по степени простоты и скорости достижения цели с их помощью;

- точность – требование, частично определяющее и адекватность модели, формулируется как степень совпадения значений характеристик реального объекта и тех же характеристик модели;
- экономичность – определяется затратами ресурсов оперативной и постоянной памяти компьютера и временем на ее разработку, реализацию и непосредственную эксплуатацию. Численно экономичность определяется по затратам вычислительных ресурсов для ее реализации. Следует отметить противоречивость требований к моделям: обладание широкой адекватностью, высокой универсальностью и экономичностью, обусловливает использование ряда моделей для одного объекта, ввиду невозможности сочетания этих требований в одной.

Основные этапы моделирования

Моделирование – творческий процесс. С целью обобщения, его следует представить поэтапно. При решении конкретной задачи схема разбиения может подвергаться некоторым изменениям: какие-то этапы могут быть убраны или изменены, какие-то добавлены. Содержание этапов определяется поставленной задачей в соответствии с целями моделирования. В общем случае процесс построения и исследования модели можно представить следующей схемой:

1. постановка задачи: определение целей анализа и путей их достижения и выработка общего подхода к разрешаемой задаче. Данный этап предполагает углубленное понимание проблематики поставленной задачи. Зачастую сложность формулировки исследовательской задачи идет наравне с ее решением. Постановка задачи не является лишь формальным процессом, хотя общих правил для него не разработано;
2. изучение основ научной теории и сбор информации о моделируемом объекте: на этом этапе подбирается подходящая теоретическая база. При ее отсутствии, следует определить причинно - следственные связи между эндогенными воздействиями описывающими объект. Определяются экзогенные воздействия и выходные данные, принимаются упрощения и предположения;
3. формализация: состоит в определении системы условных обозначений. Далее посредством их описываются взаимосвязи между составляющими объекта и представляются в виде математических формул. Необходимо строго регламентировать класс задач, к которым можно отнести полученную математическую модель объекта;
4. выбор метода решения: на этом этапе определяются окончательные значения внутренних переменных модели с учетом возмущающих условий функционирования объекта. Для сформулированной на первом этапе математической задачи подбирается определенный метод решения или разрабатывается специализированный собственный метод. При подборе метода учитывается человеческий фактор пользователя, а так же предпочтения заказчика и разработчика;
5. реализация модели: после разработки алгоритма, создается виртуальная программа, которая впоследствии требует отладки, тестирования и в итоге решается поставленная задача;
6. анализ получаемой информации: требуется сопоставить полученное в ходе моделирования и заранее предполагаемое решение, после чего проводится контроль погрешности моделирования;
7. проверка адекватности: результаты, полученные в результате моделирования, сравниваются с информацией об объекте или проводится натурный эксперимент и затем его результаты сопоставляются с расчетными. Процесс моделирования зачастую представляется итеративным.

В случае неудовлетворительных результатов полученных на этапах 6 и 7 осуществляется возврат к одному из предыдущих этапов, который мог сопутствовать разработке неправильной модели. Выявленный этап и все последующие уточняются, и такой процесс происходит до тех пор, пока не будут получены результаты в допускаемых пределах погрешности.

Вопрос о необходимости и достаточности соответствия моделируемому объекту или адекватности модели является одним из наиболее важных в модельной методологии. Под эффективностью следует понимать полезность практического применения модели. Процесс моделирования, как правило, сопровождается взаимодействием двух противоположных друг дру-

гу тенденций. С одной стороны, разработчик всегда стремиться к максимально полному и точному воссозданию свойств и характеристик объекта в его модели. При этом неизбежно возрастает сложность модели, которая проявляется в увеличении числа переменных, учитываемых взаимосвязей, повышении требований к точности входных воздействий и т.д. Именно сочетание этих противоречащих качеств рассматривается как мера совершенства модели. При этом практически доказано, что эффективность модели обратно пропорциональна её сложности, быстро убывая с ростом последней.

При создании математической модели определение наилучшего сочетания универсальности с одной стороны и простоты с другой, является очень сложной задачей, в виду неформализуемости и неоднозначности большинства подлежащих учету связей.

Пара задача-объект полностью определяет перечень подлежащих учету переменных объекта: отображаемые в модели параметры объекта, число и характер связей между ними, требования к точности получаемых данных и ряд других важнейших характеристик.

Важнейшим фактором эффективности считается применяемый математический аппарат. Значащим является и такой субъективный фактор, как и уровень подготовки и осведомленности исследователя.

Таким образом, можно сделать вывод: наилучшее качество или эффективность модели достигается как компромисс между её адекватностью и простотой, обеспечивающей возможность и удобство использования модели; чрезмерная точность модели на практике ведет к усложнению и увеличению затрат, времени на ее изготовление, усложнению эксплуатации.

Качество модели напрямую зависит от способности разработчика понять существо, физику изучаемого процесса и создать его адекватное математическое описание. Сложность нарастает с увеличением взаимосвязей и числа характеристик модели. И задача разработчика состоит не только в том, чтобы создать полное математическое описание процессов, т. е. модель, но и разработать методику работы для пользователя. Со сложными многопараметрическими моделями трудно проводить исследования, поэтому вынужденной мерой при формализации реального процесса является проведение структурной декомпозиции работ, отбрасывание многих, менее существенных связей, введение допущений в математическом описании. Для каждого конкретного случая необходима методика, позволяющая с большой степенью достоверности определить адекватность модели и объекта, ею описываемого, область возможного применения и круг решаемых вопросов.

Зачастую методы математического моделирования являются единственно применимыми. Например, в физике реактора до проведения натурных экспериментов выполняются всесторонние исследования с применением математических моделей. Такое математическое моделирование и «проигрывание» различных вариантов на ЭВМ позволило в кратчайшие сроки обоснованно спланировать и приступить к реализации плана ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы и аварии на АЭС Фукусима. Выполним простейшее математическое описание объекта в практике моделирования на примере [8]. Рассмотрим идеализированный объект - математический маятник, то есть точечную массу, закрепленную на невесомом нерастяжимом подвесе, которая двигается без диссипации (рис. 1).

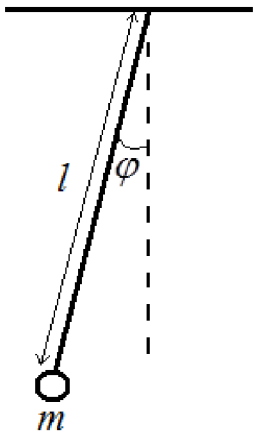


Рис. 1. Математический маятник.

Уравнение движения такой системы представляет собой второй закон Ньютона для вращательного движения:

$$I\,d^2\varphi/dt^2 = M\,,$$

где: φ – угол отклонения,

$I = ml^2$ – момент инерции,

$M = mgl\sin\varphi$ – момент силы.

После подстановки получим:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega_0^2 \sin\varphi = 0\,,\ \omega_0^2 = g/l\,.$$

И для малых углов отклонения ($\varphi << l$):

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega_0^2\varphi = 0$$

Полученное уравнение описывает математическую модель рассмотренной физической системы. Эта модель называется «линейным консервативным осциллятором».

По формальной классификации эта модель линейная, детерминированная, динамическая, непрерывная. В процессе её построения мы сделали множество допущений (об отсутствии внешних сил, отсутствии трения, малости отклонений и т. д.), которые в реальности могут не выполняться.

Заключение

В ходе работы выполнено исследование математического описания объекта и предложен подход к методам постановки математических задач, возникающих в реальных практических ситуациях. Установлено:

1. решение любой практической задачи всегда связано с исследованием, преобразованием некоторого объекта;
2. моделирование возникает, когда субъект решает поставленную перед ним задачу, и результат зависит как от решаемой задачи, так и от субъекта моделирования. То есть цель моделирования имеет двойственную природу: с одной стороны, она объективна, так как вытекает из задачи исследования, а с другой стороны исследователь всегда корректирует её в зависимости от опыта, интересов, мотивов деятельности;
3. для одного объекта разработчику зачастую легче построить несколько моделей, если он решает разные задачи, приводящие к разным целям моделирования;
4. разные объекты могут иметь одинаковые по виду модели, даже если их строили разные субъекты, исходя из разных целей моделирования.

Список литературы

1. Rogers Kara. Scientific modeling [Электронный ресурс] – Encyclopaedia Britannica / Science. Arizona, 2011. – Режим доступа: https://www.britannica.com/science/scientific-modeling
2. Новик И.Б. О философских вопросах кибернетического моделирования / И.Б. Новик. - М.: Знание, 1964. - 40 с.
3. Советов Б.Я. Моделирование систем: Учебник для вузов. / Б.Я, Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 2001. – 343 с.
4. Самарский А.А. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. / А.А. Самарский, А.П. Михайлов – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
5. Мышкис А.Д. Элементы теории математических моделей. / А.Д. Мышкис. – М.: КомКнига, 2007. – 192 с.
6. Севостьянов А.Г. Моделирование технологических процессов: учебник / А. Г. Севостьянов, П. А. Севостьянов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 344 с.
7. Gorban A.N. Model Reduction and Coarse-Graining Approaches for Multiscale Phenomena / A.N. Gorban, N. Kazantzis, I.G. Kevrekidis, H.C. Öttinger, K. Theodoropoulos // Springer, Complexity series [Электронный ресурс]. Berlin, 2006. – 560 pp. – Режим доступа: https://books.google.com/books?id=q6N2I7VrBDcC&dq=ISBN+3-540-35885-4&hl=ru&source=gbs_navlinks_s
8. Анисимов И.А. Колебания и волны / И.А. Анисимов. – К.: Академпрес, 2003. – 280 с.

References

1. Rogers Kara. *Scientific modeling*. Encyclopaedia Britannica / Science. Arizona, 2011. – Available at: https://www.britannica.com/science/scientific-modeling (accessed 04.03.2018)
2. Novik I.B. *O filosofskih voprosah kiberneticheskogo modelirovaniya* [About the philosophical questions of cybernetic modeling]. Moscow, Znanie publ., 1964, 40 p.
3. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. Modelirovanie system: uchebnik dlya vuzov [Modeling of systems: Textbook for high schools]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 2001, 343 p.
4. Samarskij A.A., Mihajlov A.P. *Matematicheskoe modelirovanie. Idei. Metody. Primery* [Math modeling. Ideas. Methods. Examples]. Mosow, Fizmatlit publ., 2001, 320 p.
5. Myshkis A.D. *Ehlementy teorii matematicheskih modelej* [Elements of the theory of mathematical models]. Moscow, Komkniga publ., 2007, 192 p.
6. Sevostyanov A.G. Sevostyanov P.A. Modelirovanie tekhnologicheskih processov: uchebnik [Modeling of technological processes: a textbook]. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost publ., 1984, 344 p.
7. Gorban A.N., Kazantzis N., Kevrekidis I.G., Öttinger H.C., Theodoropoulos K. *Model Reduction and Coarse-Graining Approaches for Multiscale Phenomena* / Springer, Complexity series, Berlin, 2006. 560 p. Available at: https://books.google.com/books?id=q6N2I7VrBDcC&dq=ISBN+3-540-35885-4&hl=ru&source=gbs_navlinks_s (accessed 04.03.2018)
8. Anisimov I.A. Kolebaniya i volny [Oscillations and waves]. Kiev, Akadempres publ., 2003, 280 p.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.313.323

Исследование критерия втягивания ротора синхронного гребного электродвигателя в синхронизм

Н.В. Берлад[1], О.М. Крастелёв[2]

[1]Филиал ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова» в г.Севастополь, Севастополь, 299006, РФ, ms.berlad@mail.ru,[2]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299015, РФ, olkrast@gmail.com

Статья поступила 05.04.2018 г.; после доработки 08.04.2018 г.

Аннотация

В статье анализируются переходные процессы при втягивании синхронного гребного электродвигателя в синхронизм, позволяющие рассчитать входной момент $M_{вх}$ при заданных значениях напряжения и частоты судовой питающей сети.

Ключевые слова: синхронный электродвигатель, гребная электрическая установка, колебания ротора, синхронизм, момент сопротивления. Для цитирования

The study criterion of retraction of the rotor of the synchronous propeller of the motor in synchronism

N.V. Berlad[1], O.M. Krastelev[2]

[1]FSBEI HE Branch of the "State Maritime University named after Admiral F. F. Ushakov" in Sevastopol, Sevastopol, 299006, RF, ms.berlad@mail.ru,[2]FSAEI HE "the Sevastopol state University»,Sevastopol, 299015, RF, olkrast@gmail.com

Received 05.04.2018 y.; received in final form 08.04.2018 y.

Annotation

The article analyzes the transients when pulling the synchronous rowing motor into synchronism, allowing to calculate the input torque of the MVH at the specified voltage and frequency of the ship's supply network.

Key words: synchronous motor, a rowing electrical installation, vibrations of the rotor, the synchronism, the moment of resistance. For citation.

Введение

В современных и перспективных ГЭУ (гребных электрических установках) переменного тока [1,2] используются синхронные и асинхронные гребные электродвигатели (ГЭД). ГЭД асинхронного и синхронного типа имеет положительные и отрицательные стороны.

Однако предпочтение отдают синхронным двигателям, так как они дают возможность регулировать коэффициент мощности в главных цепях и доводить его значение до единицы. Кроме этого синхронные электродвигатели имеют ряд положительных качеств эксплуатационного и конструктивного характера [2].

Переходные процессы синхронного электродвигателя

При работе синхронной машины ротор испытывает колебания угловой частоты относительно синхронной угловой частоты двигателя.

Одновременно с колебаниями частоты вращения ротора происходит колебание угла нагрузки.

Характер протекания переходного процесса зависит не только от исходного режима машины, но и от вида возмущений. Возмущения бывают вынужденные и свободные.

Вынужденные колебания возникают тогда, когда механический момент на валу непостоянен. Свободные колебания ротора обусловлены самой природой синхронной машины (СМ). Физическую картину свободных колебаний рассмотрим с помощью статической угловой характеристики СМ, представленной на рис. 1.

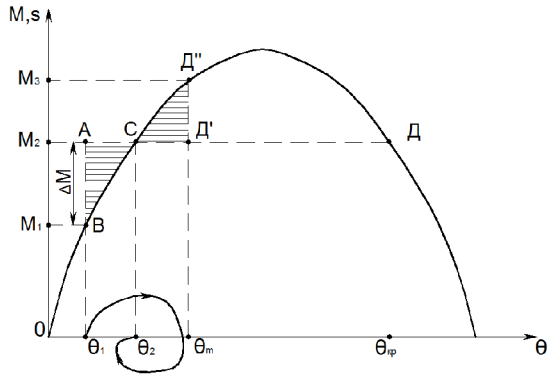


Рис.1. Изменения частоты и угла нагрузки при изменении момента сопротивления на валу синхронного двигателя

При постоянной частоте вращения электромеханический момент СМ равен моменту сопротивления на валу двигателя:

$$M_{эм} = M_c \qquad (1)$$

Если момент M_c изменится, допустим увеличится с M_1 до M_2, тогда ротор двигателя тормозится, угол θ и момент $M_{эм}$ увеличится. Но вследствие инерции ротор вращается некоторое время с замедленной частотой. В последующее время $M_{эм}$ возрастает от M_1 до M_2, частота вращения ротора меньше синхронной, скольжение s максимальное, угол θ увеличивается и как следствие увеличивается и $M_{эм}$.

Электромагнитный момент $M_{эм}$ достигает значения M_3 и появляется избыточный положительный момент под воздействием которого частота вращения ротора достигает синхронной частоты и продолжает увеличиваться выше синхронной (s' < 0), угол θ уменьшится. Под воздействием демпферных моментов, возникшие колебания частоты ротора вращения уменьшатся до нуля и через некоторое время наступает установившийся режим, характеризуемый углом θ_2 нагрузки и электромагнитные моменты:

$$M_{эм} = M_1 = M_{c2}$$

Рассмотрим случай, когда энергия торможения уравновешивается энергией, полученной при ускорении, не в точке Д", а в точке Д. Точку Д называют критической, так как при дальнейшем увеличении угла θ на ротор действуют не ускоряющие, а тормозящие силы и двигатель выпадает из синхронизма. Работая в процессе пуска как асинхронный СД должен развивать частоту вращения, близкую к синхронной, и после включения возбуждения войти в синхронизм.

Условия втягивания ротора СД в синхронизм характеризуется входным моментом $M_{вх}$ [3]. Обычно при проектировании СД используют специальные критерии синхронизации, основанные на определении критического скольжения $s_{кр}$, которое изменяется в широких пределах в зависимости от нагрузки на валу двигателя. В качестве критерия втягивания в синхронизм при проектировании и эксплуатации следует принимать значение $M_{вх}$, равное максимальному моменту сопротивления на валу двигателя, при котором двигатель достигает синхронной частоты вращения, работая от судовой сети с номинальным напряжением и частотой. В это время входной момент $M_{вх}$ СД зависит лишь от момента инерции вращающихся масс [4].

Если момент сопротивления M_c меньше максимального момента, развиваемого в синхронном режиме, то СД втягивается в синхронизм. При этом избыточный момент развиваемый в асинхронном режиме, должен быть достаточным для того, чтобы придать ротору ускорение до синхронной частоты.

Вывод упрощённого критерия втягивания ротора СД в синхронизм

Руководствуясь этим, можно вывести упрощённый критерий втягивания ротора СД в синхронизм, пренебрегая электромагнитными переходными процессами.

Рассмотрим уравнение движения ротора при небольших отклонениях частоты вращения ротора от синхронной [5] в виде:

$$T_J\left(\frac{d^2\theta}{d\tau^2}\right) + M_{ср} + M(\theta) = M_c, \qquad (2)$$

где: $T_J\left(\frac{d^2\theta}{d\tau^2}\right)$ - динамический момент;

$M_{ср} = K \cdot \frac{d\theta}{d\tau}$ - средний электромагнитный момент;

K – коэффициент пропорциональ-ности;

$M(\theta) = M_m \cdot \sin\theta$ – пульсирующая составляющая электромагнитного момента, не зависящая от скольжения s';

M_c – момент сопротивления на валу СД;

τ – время ($\tau=\omega_s^2 \cdot t$);

T_J – инерционная постоянная;

В первом приближении можно считать, что средняя составляющая момента M_c, при втягивании ротора в синхронизм, полностью уравновешивает момент сопротивления. Тогда (2) примет вид:

$$T_J\left(\frac{d^2\theta}{d\tau^2}\right)+M_m\cdot\sin\theta=0. \qquad (3)$$

Умножив обе части уравнения (3) на $d\theta$ получим:

$$T_J\left(\frac{d^2\theta}{d\tau^2}\right)\cdot d\theta=-M_m\cdot\sin\theta\cdot d\theta \quad \text{или}$$

$$0{,}5\cdot T_J\cdot d\left(\frac{d\theta}{d\tau}\right)^2=M_m\cdot d(\cos\theta),$$

так как $\frac{d\theta}{d\tau}=s'$, то

$$0{,}5\cdot T_J\cdot d(s)^2=M_m\cdot d(\cos\theta). \qquad (4)$$

Если принять, что небольшое скольжение $s_{кр}$, при котором возможно втягивание ротора СД в синхронизм, то для этого максимальная работа синхронизирующих сил должна быть достаточной, чтобы придать ротору ускорение скольжения от $s = s_{кр}$ до $s = 0$.

Интегрируя левую часть уравнения (4) от $s = s_{кр}$ до $s = 0$, а правую часть от $\theta = 0$ до $\theta = \pi$, получим:

$$0{,}5\cdot T_J\cdot s_к^2=-2\cdot M_m, \text{ откуда}$$

$$s'_{кр}=2\cdot\sqrt{M_m/T_J}. \qquad (5)$$

Однако, только при $s = s_{кр}$ имеет место приближённое равенство $M_c = M_{ср}$, причём при изменении скольжения от $s'_{кр}$ до 0 средний момент $M_{ср}$ изменяется от момента сопротивления M_c до 0. В то же время момент M_c можно считать неизменным, так как частота вращения ротора изменяется незначительно. Появившаяся разность моментов $\Delta M = M_c - M_{ср}$ препятствует втягиванию ротора СМ в синхронизм.

Для определения и учёта появившейся разности моментов необходимо знать зависимость $s=f(\theta)$. Интегрируя (4), найдём:

$$0{,}5\cdot T_J\cdot s^2=M_m\cdot\cos\theta+C. \qquad (6)$$

Находим постоянную С из условий:

$\theta = \pi$, а $s = 0$, тогда $C = M_m$.

Решая уравнение (6) определяем скольжение:

$$s=2\cdot\sqrt{M_m/T_j}\cdot\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)= \qquad (7)$$

$$=s_{кр}\cdot\cos\left(\frac{\theta}{2}\right).$$

При $\theta=0$, $K\cdot s_{кр}=M_c$ или $K=M_c/s_{кр}$.

Умножая обе части уравнения (7) на K получим среднюю составляющую момента:

$$K\cdot s=(M_c/s_{кр})\cdot s_{кр}\cdot\cos(\theta/2)=$$

$$=M_c\cdot\cos(\theta/2). \qquad (8)$$

Преобразуя уравнение (8) и умножая обе части уравнения на $d\theta$, получим:

$$d(s)^2=(2\cdot M_m/T_J)\cdot d(\cos\theta)+$$

$$+\ (2/T_J)\cdot(M_c-K\cdot s)\cdot d\theta. \qquad (9)$$

Подставляя (8) в (9), проинтегрируем левую часть уравнения в пределах от $s_{кр}$ до 0, а правую – в пределах от 0 до π, находим:

$$s_{кр}=2\cdot\sqrt{\left[M_m-M_c(\pi-2)/2\right]/T_J}= \qquad (10)$$

$$=2\sqrt{(M_m-0{,}6\cdot M_c)/T_J}.$$

Уравнение (10) позволяет определить максимальную величину скольжения при котором ротор СД, работающий в асинхронном режиме, под воздействием синхронизирующих сил может достичь синхронной частоты вращения.

На практике [4] критическое скольжение получается значительно меньше, при втягивании ротора СД в синхронизм в стадии включения возбуждения в невыгодный момент времени. С этой целью в уравнении (10) коэффициент 2 уменьшается до 1,05, тогда:

$$s_{кр}\le 1{,}05\sqrt{(M_m-0{,}6\cdot M_c/T_J)}. \qquad (11)$$

Так как наиболее полную синхронизирующую способность СД характеризует входной момент $M_{вх}$, то выражение для него получим из (11), учитывая, что $M_{вх} = M_c$ на валу СД, при котором возможно втягивание в синхронизм. Тогда:

$$S_{кр}=M_c/K=M_{вх}/K. \qquad (12)$$

Подставляя (12) в (11) получим уравнение:

$$M_{вх}/K=1{,}05\cdot\sqrt{(M_m-0{,}6\cdot M_{вх})/T_J}$$

Решая его относительно $M_{вх}$, находим:

$$M_{вх}=\frac{-0{,}66+\sqrt{0{,}43+4{,}4\cdot M_m\cdot T_J/K^2}}{2\cdot T_J/K^2}. \qquad (13)$$

Вывод

При проектировании СД уравнение (13) позволяет рассчитать входной момент при заданных значениях напряжения и частоты судовой питающей сети и определить как он будет

изменяться при изменении момента инерции вращающихся масс.

Список литературы

1. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. - М.: Энергия, 1980.- 928 с.
2. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.
3. Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В.,Харьков К.А. Электрические машины. – М.: Высшая школа. 1987. – 287 с.
4. Лютер Р.А. Расчёт синхронных машин. – Л.: Энергия, 1979. – 272 с.

List of references

1. Ivanov-Smolensky, A. V. Electrical machines. - Moscow: Energy, 1980.- 928 p.
2. The A. I. important Transients in machines AC. - L.: Energy, 1980. - 256 p.
3. Sipaylov G. A., Kononenko E. V.,Kharkov, Ukraine K. A. Electric machines. - M.: Higher school. 1987. - 287 p.
4. Luther, R. A. Calculation of synchronous machines. - L.: Energy, 1979. - 272 p.

УДК 621.313.332

Особенности работы и регулирования напряжения асинхронных генераторов в специальных автономных системах электроснабжения

Н.В. Берлад[1], В.В. Смирнов[2]
[1]*Филиал ФГБОУ ВО «Государственный морской университет имени адмирала Ф.Ф.Ушакова» в г.Севастополь, Севастополь, 299006, РФ, ms.berlad@mail.ru,*
[2]*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299006, РФ, Vadim Smsmov.56@mail.ru*

Статья поступила 15.04.2018 г.; после доработки 18.02.2018 г.

Аннотация

В статье производится анализ работы асинхронного генератора, как источника электроэнергии в системах автономного электроснабжении с использованием конденсаторных батарей в качестве необходимого элемента поддержания необходимого уровня возбуждения АГ, а также как элемента стабилизации выходных параметров напряжения.

Ключевые слова: асинхронный генератор, конденсаторная батарея, самовозбуждение, стабилизация напряжения, внешняя характеристика. Для цитирования

Features of operation and voltage regulation asynchronous generators in special autonomous power supply systems

N.V.Berlad[1], V.V.Smirnov[2]
[1]*FSBEI HE Branch of the "State Maritime University named after Admiral F. F. Ushakov" in Sevastopol, Sevastopol, 299006, RF, ms.berlad@mail.ru,*
[2]*FSAEI HE "the Sevastopol state University», Sevastopol, 299006, RF, Vadim Smsmov.56@mail.ru*

Received 15.04.2018 y.; received in final form 18.04.2018 y.

Annotation

The article analyzes the operation of an asynchronous generator as an electric power source in Autonomous power supply systems using capacitor banks as a necessary element to maintain the required level of AG excitation, as well as an element of stabilization of the output voltage parameters.

Keywords: asynchronous generator, capacitor Bank, self-excitation, voltage stabilization, external characteristic. For citation

Введение

В последние годы в автономных системах электроснабжения находят применение асинхронные генераторы, так как они имеют ряд преимуществ:

- просты по конструкции (с роторной обмоткой в виде беличьей клетки);
- не имеют скользящих контактов;
- обладают высокой надёжностью.

Простота конструкции, высокая механическая прочность ротора позволяет использовать генератор при больших частотах вращения.

Расход мощности на регулирование напряжения в 5-10 раз меньше, чем у магнитоэлектрических генераторов [1].

Особенности возбуждения асинхронных генераторов

Возбуждение АГ(асинхронного генератора) производится двумя способами – от сети и самовозбуждением с использованием конденсаторов. Первый из них состоит в том, что ротор асинхронной машины, включенной на напряжение сети, ускоряется первичным двигателем до сверхсинхронной частоты вращения. Машина работает с отрицательным скольжением в генераторном режиме, скольжение s равно:

$$S' = (n_1 - n_2) / n_1 < 0 \qquad (1)$$

где: n_1 – синхронная частота вращения;

n_2 – частота вращения ротора.

Этот режим потребляет из сети намагничивающий ток 25 – 30 % от номинального, что является существенным недостатком АГ при этом способе возбуждения. Кроме этого АГ, потребляя намагничивающий ток, снижает коэффициент мощности сети.

Другой способ возбуждения АГ заключается в самовозбуждении от потока остаточного намагничивания сердечника ротора, которому соответствует $E_{ост}$. В этом случае к зажимам машины подключают батарею конденсаторов (рис.1,а).

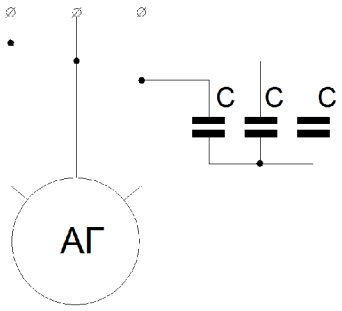


Рис. 1(а). Схема подключения конденсаторов к АГ

Самовозбуждение АГ возможно при обеспечении трёх условий:

1. наличия остаточного магнитного потока $Ф_{ост}$, который наводит при вращении АГ в обмотке статора $E_{ост}$;
2. частота вращения ротора должна быть выше критической, то есть такой, при которой начальная ЭДС $E_{ост}$ будет иметь необходимое значения;
3. характеристика внешней цепи $U_c = X_c \cdot I_c$ должна пересекать кривую намагничивания в точке номинального напряжения, то есть ёмкость должна быть больше критической.

Увеличение напряжения при самовозбуждении продолжается до точки пересечения кривой намагничивания $E_{ф1} = f(I_m)$ и вольтамперной характеристики конденсаторов $U_{фс} = f(I_c)$, (рис.1,б), где:

I_m – намагничивающий ток АГ;

I_c – ток, проходящий через конденсатор фазы;

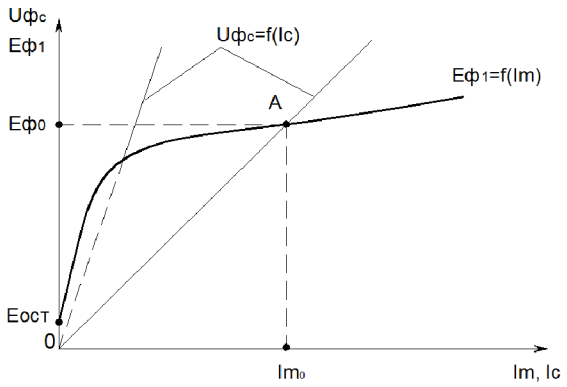


Рис.1(б). Характеристики самовозбуждения АГ

Генератор возбуждается, если ёмкость конденсатора больше критической, то есть $C > C_{кр}$.

В точке А пересечения кривых $E_{ф1} = f(I_m)$ и $U_{фс} = f(I_c)$, (рис.1,б) наступает равенство между напряжениями генератора и конденсаторов:

$$I_c \cdot \omega_1 \cdot L_1 = I_c / \omega_1 \cdot C_1 \qquad (2)$$

где: $\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot f_1$ – угловая частота вращения поля статора;

f_1 – частота сети статора;

$L_1 = (X_{s1} + X_m) / \omega_1$ - индуктивность фазы обмотки генератора;

X_{s1} – индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора;

X_m – индуктивное сопротивление намагничивания;

C – ёмкость, приведённая к фазному напряжению.

В точке А $I_m = I_c$, тогда из (2) получим:

$$L_1 \cdot C_1 = 1 / \omega_1^2 , \qquad (3)$$

$$f_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}} . \qquad (4)$$

Если принять, что при холостом ходе S' = 0, то $f_1 = f_2$, где f_1 – частота вращения поля ротора.

В этом случае:

$$f_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}} . \qquad (5)$$

Схема замещения и векторная диаграмма напряжений асинхронного генератора с само-

возбуждением представлены на рисунках 2,(а) и 2,(б).

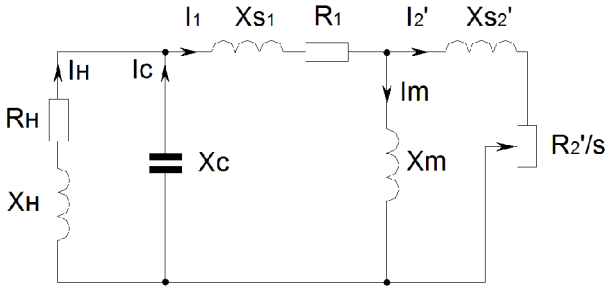


Рис.2(а). Схема замещения АГ с самовозбуждением.

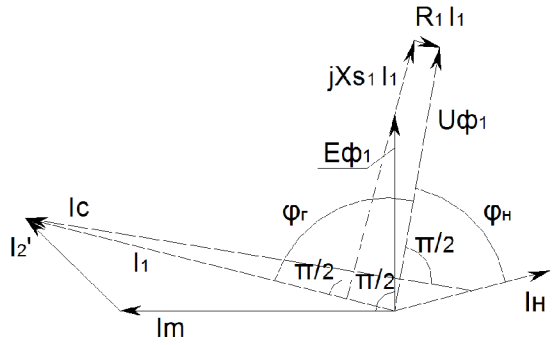


Рис.2(б). Векторная диаграмма напряжений АГ с самовозбуждением.

Конденсаторы должны снабжать реактивной мощностью асинхронный генератор и питающую сеть. Полная мощность АГ выражается как:

$S'_г = P_г \cdot cos\varphi_г$,

где $P_г$ – активная мощность генератора;

Тогда реактивная мощность АГ равна:

$Q_г = S_г \cdot sin\varphi_г = P_г \cdot tg\varphi_г$

Учитывая это, реактивная мощность конденсаторов определяется, как сумма реактивных мощностей генератора и сети:

$$Q_c = Q_г + Q_н = m_1 \cdot U_c \cdot I_c = P_г \cdot tg\varphi_г + P_н \cdot tg\varphi_н . \quad (6)$$

где U_c, I_c – напряжение и ток на конденсаторе;

Если $P_г = P_н = P_{ном}$, то

$$Q_c = P_{ном} \cdot (tg\varphi_г + tg\varphi_н), \quad (7)$$

где $P_{ном}$ – номинальная активная мощность генератора;

Ёмкость конденсаторов, как источника реактивной мощности генератора и сети, определяется из выражений (6) и (7) с учётом:

$X_c = 1/\omega_1 \cdot C = U_c/I_c = m_1 \cdot U_c^2/Q_c$, откуда

$$C = Q_c / \omega_1 \cdot m_1 \cdot U_c^2 = P_{ном} \cdot (tg\varphi_г + tg\varphi_н) / \omega_1 \cdot m_1 \cdot U_c^2 . \quad (8)$$

Внешняя характеристика АГ

Внешняя характеристика АГ является сильно падающей и зависит от величины возбуждающей ёмкости (рис.3,а,б).

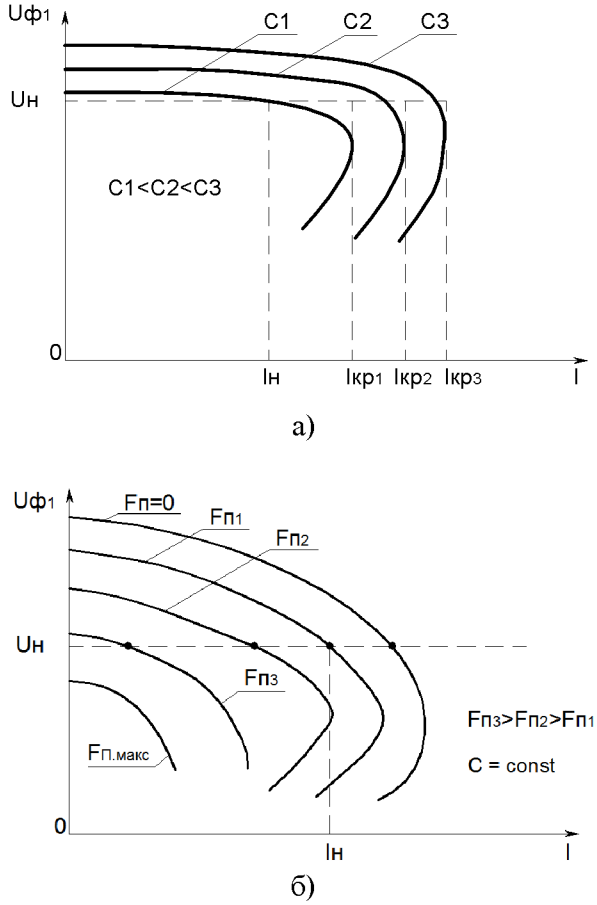


Рис.3(а,б). Внешние характеристики АГ.

Сильное уменьшение напряжения на зажимах генератора с увеличением нагрузки объясняется тем, что увеличение внутреннего падения напряжения вызывает уменьшение намагничивающего тока и ЭДС, наводимой вращающимся магнитным полем в фазе статора. Другой причиной уменьшения ЭДС является размагничивающее действие вторичного контура.

Стабилизация напряжения АГ является одной из наиболее важных проблем, связанных с использованием генератора в автономных системах [2]. Входное напряжение генератора можно стабилизировать за счёт изменения частоты вращения ротора или основного магнитного потока. Регулировать напряжение за счёт изменения частоты вращения ротора технически сложно. Этот способ практически не используется [3].

Напряжение АГ регулируют изменением основного магнитного потока при n_2=const с помощью:

- подмагничиванием спинки статора генератора;
- изменением напряжения на конденсаторах;
- изменением ёмкости шунтирующих конденсаторов;
- применением феррорезонансного стабилизатора напряжения, управляемых реакторов или конденсаторов-варикондов.

Наиболее эффективна стабилизация напряжения шунтирующими конденсаторами-варикондами. Остальные способы регулирования напряжения усложняют конструкцию и увеличивают массо-габаритные показатели АГ, что делает их применение нерациональным.

Необходимо отметить, что регулирование напряжения АГ в настоящее время остаётся важной и ещё неполностью решённой проблемой.

Вывод

Существенным недостатком АГ, работающих на сеть, является то, что при коротком замыкании в сети он теряет возбуждение и сбрасывает нагрузку. Исследования АГ сегодня актуальны и по данному направлению проводятся интенсивные разработки.

Список литературы

1. Берлад Н.В. Особенности использования асинхронных генераторов в судовых электроэнергетических системах / Берлад Н.В., Крастелев О.М., Киселёв В.Н.// Научный вестник Первого Украинского морского института, 2013.-№1.- с.28-34
2. Бертинов А.И., Бут Д.А. и др. Специальные электрические машины. – М., Энергоиздат, 1982. – 552 с.
3. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. – М., Энергоиздат, 1986. – 163 с.

List of references

1. Berlad N.V. Features of the use of asynchronous generators in ship electric power systems / Berlad N.V., Krastelev O. M., Kiselev V. N.// Scientific Bulletin of the First Ukrainian Maritime Institute, 2013.- No. 1.- p. 28-34
2. Bertino A. I., Booth, D. A., and other Special electrical machines. - M., Energoizdat, 1982. - 552 p.
3. Booth D. A. Contactless electrical machines. – Moscow, Energoizdat, 1986. - 163 p.

УДК 621.311.1

Анализ возможности использования атмосферного электричества

А.И. Кавун[1] , И.А. Кочетов[2], В.В. Смирнов[3]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]avraam.kavun@mail.ru, [2] kochetov.vanek@mail.ru, [3]SVadick@mail.ru

Статья поступила 29.03.2018 г.; после доработки 08.04.2018 г.

Аннотация

В статье выполнен анализ наличия свободного электричества в атмосферных слоях, проанализированы причины его поддержания на высоком уровне, рассмотрены подходы к получению электрического тока в системе, позволяющей его использование с техническими целями. Дополнительно, в ходе анализа, были рассмотрены электротехнические устройства, позволяющие аккумулировать полученную электроэнергию.

Ключевые слова: атмосфера Земли, электричество, разность потенциалов, электрическое поле, накопители электроэнергии.

Analysis of the possibilities of using atmospheric electricity

A.I. Kavun[1], I.A. Kochetov[2], V.V. Smirnov[3]
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, [1]avraam.kavun@mail.ru, [2]kochetov.vanek@mail.ru, [3]SVadick@mail.ru

Received 29.03.2018 y.; received in final form 08.05.2018 y.

Abstract

The article analyzes the presence of free electricity in the atmospheric layers, analyzes the reasons for maintaining it at a high level, examines the approaches to obtaining an electric current in the system, which makes it possible to use it for technical purposes. In addition, during the analysis, electrical devices were considered that allow the accumulation of electricity received.

Keywords: Earth atmosphere, electricity, potential difference, electric field, energy storage.

Введение

Потребление электрической энергии в мире растет быстрыми темпами, определяя технический прогресс в развитии общества. При этом большинство необходимых для этого ресурсов имеется в ограниченном количестве. Со дня на день встанет проблема её дефицита, что заставляет рассматривать ещё не используемые возможности. Одной из них является использование атмосферного электричества. Разность потенциалов между землей и ионосферой огромен и достигает 400 кВ, а его потенциальная энергия равна миллионам гигаватт. За счет природных процессов, которые протекают у поверхности земли – получается первая обкладка конденсатора. Основным компонентом, который формирует потенциал у поверхности планеты, является вода. За счет процессов перехода в различные агрегатные состояния (испарение, конденсация и т.д.) образуется мощное покрывало из отрицательно заряженных частиц, которые располагаются по всей поверхности планеты. Верхняя обкладка конденсатора - ионосфера. Положительные частицы образуются главным образом за счет ударной ионизации от космического излучения. Таким образом, в результате природных процессов на нашей планете образуются два разноименных заряда, которые непрерывно накапливаются в результате удар-

ной бомбардировки из космоса и за счет природных процессов у поверхности земли. Так же происходит и разряд обкладок конденсатора. Во время пробоя диэлектрика это молния. Молния не что иное, как кратковременное замыкание двух разноименных потенциалов с выделением энергии в виде света и тепла. Энергии настолько много, что разряды молний влияют на нагрев атмосферы планеты наравне с солнечным излучением и тепличным эффектом газов. С первого взгляда получение электричества из атмосферы выглядит достаточно простым. Сложности состоят в том, как преобразовать полученную энергию в электроэнергию с необходимыми потребителю характеристиками.

Постановка цели

Целью данной работы является анализ подходов к получению электроэнергии из атмосферы.

Исследования атмосферного электричества

Попытки исследования воздушного электричества предпринимались давно. Одним из первопроходцев был Бенджамин Франклин. Он изучал природу молний, запуская воздушного змея в грозу. Он же изобрел громоотвод, конструкция которого практически не изменилась до наших дней. Одновременно подобные опыты проводились и в других странах. В России исследованием атмосферного электричества занимался сподвижник Ломоносова Георг Рихман. Он поднимал в воздух провода, чтобы продемонстрировать, что электричество накапливается в облаках.

Сейчас природа атмосферного электричества достаточно изучена. Попытки использовать ее на благо человечества не прекращаются.

Земля – хороший проводник электричества. Как и верхний слой атмосферы – ионосфера. Нижний же слой атмосферы обычно не проводит электричество, является электрическим изолятором. Таким образом, планета и слои атмосферы являются огромным конденсатором, способным накапливать электроэнергию, подобно электрическому полю.

Гигантский конденсатор постоянно заряжается в одних регионах и разряжается в других, создавая глобальный электрический контур. В нижних слоях атмосферы Земли идут интенсивные процессы испарения, переноса тепла и влаги, образования облаков, сопровождающиеся явлениями электризации.

Молнии и осадки также переносят к земле отрицательный заряд. В результате, у поверхности Земли напряженность электростатического поля достигает 100 - 150 В/м летом и до 300 В/м зимой. Перед грозой регистрируют напряженность поля до десятков кВ/м и выше.

Станция из воздушных шаров

Для использования атмосферного электричества возможно следующее. В атмосферу запускаются группы высотных воздушных шаров, способных притягивать электричество. Эти шары соединяются электропроводами между собой и с расположенными на земле резервуарами, содержащими раствор воды и электролита. Если такой шар поднимется до нижних ионизированных слоев атмосферы, постоянный электрический ток потечет по проводу через растворенный электролит, что приведет к разложению воды на водород и кислород. Далее эти газы можно будет собрать так же, как в любом другом электролитическом устройстве. Водород можно использовать в качестве горючего для топливных элементов. Эксперименты с аэростатами, изготовленными из тонких листов магниево-алюминиевого сплава, покрытого очень острыми, электролитическим способом изготовленными иглами, провел в Финляндии доктор Герман Плаусон. Иглы содержали примесь радия, чтобы увеличить местную ионизацию воздуха. Поверхность аэростата красили цинковой амальгамой, которая в солнечную погоду давала дополнительный ток вследствие фотоэффекта. Плаусон получил мощность 0,72 кВт от одного аэростата и 3,4 кВт от двух, поднятых на высоту 300 м (рис.1).

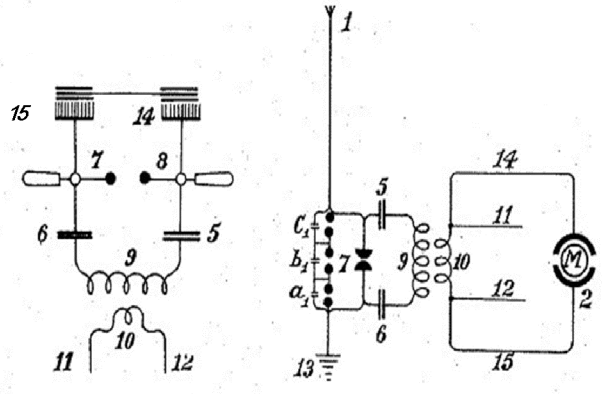


Рис. 1. Конвертер Плаусона:
1 – антенна; 9 – катушка; 2 – двигатель; 13 – заземление; а1, б1,с1 – разрядники; 5, 6 – конденсаторы; 7, 8 – шары разрядника; 11, 12, 14, 15 – выводы для потребителей.

Существуют проекты по использованию электрического поля планеты, которые опираются на механизмы отбора энергии от глобального конденсатора.

Возникают противоречия в подсчете емкости конденсатора, образованного поверхностью Земли и ионосферой.

Земной конденсатор заряжен до напряжения приблизительно 400 кВ, причем поверхность Земли имеет отрицательный заряд, а ионосфера – положительный.

Напряженность поля между «обкладками» такого конденсатора составляет 100-150 В/м у поверхности и резко падает с высотой. Как у всякого конденсатора, в нем имеются токи утечки. Эти токи очень малы, но пересчет на всю поверхность Земли дает суммарный ток утечки около 1800 А. А электрический заряд Земли оценивается в $5{,}7\times10^5$ степени Кл. То есть, земной конденсатор должен разрядиться всего за 8-10 мин. На практике, подобного не происходит. Значит, существует некий природный генератор, мощностью более 700 МВт, компенсирующий потерю заряда системы Земля – ионосфера.[1]. Но экспериментальная проверка и уточненные расчеты показывают недостаточность количества вырабатываемых зарядов для поддержания стабильного значения поля Земли. В качестве генераторов энергии рассматривалась циркуляция токов в расплавленной мантии Земли, поток частиц от Солнца (солнечный ветер).

Выдвигалась даже гипотеза о существовании природного МГД генератора, работающего в верхних слоях атмосферы. На данный момент точно не известно, откуда восполняются заряды природного конденсатор. Возможно, каждый из перечисленных механизмов дает свой вклад в пополнение заряда земного накопителя.

Попытки использовать напряженность поля Земли в утилитарных целях предпринимались более двух веков. Лучшее достижение – уже упомянутые конструкции с использованием аэростатов – позволили получить мощность около 1 кВт. Дело в том, что проводимость атмосферного воздуха составляет только 10^{14} См/м. Отобрать от столь высокоомного источника заметную мощность весьма сложно.

Для этого детали «генератора» должны иметь более надежную изоляцию – иначе он быстро «закорачивается». Высокая разность потенциалов между поверхностью Земли и ионосферой приводит к формированию электрического поля в тропосфере и стратосфере. Заряд в этом суперконденсаторе поддерживается за счет солнечного излучения, космических лучей, а также радиоактивности земной коры.

Все эти излучения взаимодействуют с магнитным полем Земли и атомами в верхних слоях атмосферы, пополняя заряд суперконденсатора.

Постоянныйзаряд атмосферного суперконденсатора составляет от 250 000 до 500 000 В, что сопоставимо с напряжением высоковольтных электрических линий.

Однако разница электрических потенциалов поверхности Земли и атмосферы – это постоянный ток, а не переменный.

Общее среднее значение силы тока, протекающего через атмосферный суперконденсатор, только в результате гроз составляет 1500 А.

Приведенные выше цифры означают, что земная атмосфера постоянно рассеивает несколько сотен миллионов ватт электроэнергии. Этой мощности хватило бы на пиковое обеспечение электроэнергией среднего города.

Электроэнергию, полученную от атмосферной электростанции можно запасать в сверхмощных накопителях, которые на данный момент уже разработаны.

Это могут быть:

– электростатические аккумуляторные батареи большой энергоемкости (АББЭ). Они рассматриваются электросетевыми и генерирующими компаниями мира, как элемент энергосистемы позволяющий осуществлять регулирование суточного графика нагрузки, для обеспечения работы электрических станций с максимальными значениями КПД;
– двухслойный и графеновый суперконденсатор.

Двухслойный суперконденсатор представляет собой импульсное электрохимическое устройство, предназначенное для компенсации быстрых переходных процессов в электрических схемах. Он состоит из двух пористых электронпроводящих электродов, разделенных заполненным электролитом сепаратором. Отсутствие фарадеевсих процессов при работе ДСК приводит к увеличению его ресурса по сравнению с аккумуляторами, а также к отсутствию ограничений по глубине его разряда.

Примеры существующих суперконденсаторов показаны в таблице 1. Процесс запасания энергии в ДСК осуществляется за счет разделения заряда на двух электродах с достаточно большой разностью потенциалов между ними.[2].

Таблица 1. *Современные двухслойные конденсаторы.*

Тип электролита	Объект	Мощность, МВт	Время работы, мин
Серно-кислотный	BEWAG, электроснабжение Зап. Берлина	8,5	20
	Резервирование и поддержание частоты маломощной сети, Пуэрто-Рико	20	15
Никель-кадмиевый	GVEA, обеспечение бесперебойного электроснабжения прибрежных районов Аляски вблизи г. Анкоридж	40	15
Серно-натриевый	Ветряная станция Rokkacho, Япония. Всего внедрено – 100 объектов.	34	600
Цинк-бромный	ПС Detroit Edison Site, Мичиган. Для поддержания напряжения собственных нужд	0,4	480
Ванадиум-редоксный	Один из крупных высокотехно-логичных заводов в Японии. Выравнивание графика нагрузок	1,5	60

Преимущества и недостатки атмосферных электростанций

В качестве преимуществ отмечаются следующие факторы:

- земельно-ионосферный суперконденсатор постоянно подзаряжается с помощью возобновляемых источников энергии: солнца и радиоактивных элементов земной коры;
- атмосферная электростанция не выбрасывает в окружающую среду никаких загрязнителей;
- атмосферная электростанция способна вырабатывать энергию постоянно.

Недостатки:

- атмосферное электричество, как и энергию солнца или ветра, трудно запасать. Его необходимо либо использовать сразу же, на месте получения, либо преобразовывать в любую другую форму;
- значительная разрядка земельно-ионосферного суперконденсатора может нарушить баланс глобального электрического контура. В этом случае последствия для окружающей среды будут непредсказуемы;
- высокое напряжение в системах атмосферных электростанций является источником повышенной опасности;
- воздушные шары необходимого размера сложно обслуживать и поддерживать на необходимой высоте;
- общее количество электроэнергии, которую можно получать из атмосферы, ограничено.

В лучшем случае атмосферная энергетика может служить лишь дополнением к другим источникам энергии.

Заключение

В работе был проведен анализ способов получения атмосферной электроэнергии, показаны особенности атмосферных электростанций, рассмотрены подходы к получению электрического тока в системе, позволяющей его использование с техническими целями, а также электротехнические устройства, позволяющие аккумулировать полученную электроэнергию.

Список литературы

1. Бортник И.М. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб. для вузов/И.М. Бортник. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с.
2. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.А. Накопители энергии/Д.А. Бут. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 400 с.

References

1. Bortnik I. M. Electrophysical fundamentals of high voltage engineering: ucheb. for universities/I. M. Bortnik. - Moscow: Publishing house MEI, 2010. - 704 p.
2. Booth D. A., Aliyev B. L., Misurin S. R., Vasyukevich P. A. energy Storage/D. A. Booth. - Moscow: Energoatomizdat, 1989. – 400 p.

.

УДК 621.311.1

Резистивное заземление нейтрали – способ повышения надежности работы электрических сетей 6-35 кВ

Н.А. Куликова[1], О.Н. Титаренко[2], В.А. Тяпкина[3]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, 299015, Россия, [1]vvkulikov@mail, [2]plotnykova198608@mail.ru,
[3]valya_tyapkina@mail.ru

Статья поступила 11.04.2018 г.; после доработки 16.04.2018 г.

Аннотация

В статье рассмотрены режимы заземления нейтрали в сетях среднего напряжения с точки зрения повышения надежности и снижения аварийности работы сетей 6-35 кВ. Указаны преимущества применения заземления нейтрали через резистор по сравнению с изолированной и компенсированной нейтралью.

Ключевые слова: сети среднего напряжения, режим заземления нейтрали, резистивное заземление, однофазное замыкание на землю, уровень перенапряжений, работа релейной защиты.

Resistive grounding of the neutral is a way to increase the reliability of 6-35 kV electrical networks

N.A. Kulikova[1], O.N. Titarenko[2], V.A. Tyapkina[3]
Federal state autonomous establishment of higher education «Sevastopol State University» Kurchatova Street, 7, Sevastopol, 299015, Russia, [1]vvkulikov@mail.ru, [2]plotnykova198608@mail.ru, [3]valya_tyapkina@mail.ru.

The article was received on 11.04.2018 y.; after improvement 16.04.2018 y.

Abstract

The article is dedicated to studying the neutral grounding modes in medium voltage electric networks in terms of improving reliability and reducing the failure rate of 6-35 kV electric networks. The article also presents the advantages of neutral grounding via a resistor compared with an isolated and compensated neutral.

Keywords: medium voltage networks, neutral grounding mode, grounding via a resistor, single-phase earth fault, level of overvoltage, operation of protective relays.

Введение

Для электроэнергетической системы России одним из самых важных направлений развития является повышение надёжности электроснабжения потребителей. Устойчивая работа электроэнергетического комплекса электрических сетей России в определенной степени определяется надежной и качественной работой электрических сетей 6-35 кВ, которые работают в основном в режиме изолированной нейтрали. Надёжная работа системы электроснабжения, которая определяется бесперебойным электроснабжением потребителей электроэнергией требуемого качества, существенно зависит от решения вопросов предупреждения отказов элементов воздушных линий среднего напряжения.

Исходя из статистических данных, примерно 80 % всех нарушений электроснабжения потребителей приходится на электрические сети 6 - 35 кВ с изолированной нейтралью, в которых одной из основных причин повреждений электрооборудо-

вания являются однофазные замыкания на землю (ОЗЗ).

При проектировании и эксплуатации электрических сетей среднего напряжения важным вопросом является выбор способа заземления нейтрали. Режим заземления нейтрали в сети 6-35 кВ определяет следующие параметры:

- ток в месте повреждения и перенапряжения на неповрежденных фазах при однофазном замыкании;
- схему построения релейной защиты от замыканий на землю;
- уровень изоляции электрооборудования;
- выбор ограничителей перенапряжения для защиты от перенапряжений;
- бесперебойность электроснабжения;
- сопротивление заземляющего устройства подстанции;
- безопасность работы персонала и электрооборудования при однофазных замыканиях.

Таким образом, режим заземления нейтрали в сети 6-35 кВ в значительной степени влияет на определенные технические решения, которые реализуются в конкретной сети.

В России режим заземления нейтрали через резистор используется в ограниченном числе сетей 6 - 35 кВ. В настоящее время при проектировании и эксплуатации сетей 6 - 35 кВ в основном используется режим изолированной нейтрали (примерно 80 % сетей 6 - 35 кВ) и режим заземления через дугогасящий реактор (примерно 20 % сетей 6 - 35 кВ). Впервые режим резистивного заземления нейтрали использовался в России в карьерных сетях 6 кВ в 1978-1983 г. и в сетях 6 кВ собственных нужд блочных электростанций примерно в 1987 г.

Постановка цели научной работы

Задачей исследования является использование заземления нейтрали через резистор в сетях 6-35 кВ как одного из способов повышения надежности работы сети. Рассмотрены различные варианты заземления нейтрали сетей среднего напряжения. Способ заземления нейтрали в значительной степени влияет на работу сетей 6-35 кВ. Актуальность резистивного способа заземления нейтрали определяется анализом достоинств и недостатков различных систем заземления нейтрали и их сравнения.

Способы заземления нейтрали

В России применяется три основных способа заземления нейтрали в сетях среднего напряжения: режим изолированной нейтрали, режим заземления через дугогасящий реактор и режим заземления через резистор.

При способе изолированной нейтрали нейтральная точка источника (генератора или трансформатора) не присоединена к контуру заземления [1].

В распределительных сетях 6 - 35 кВ России обмотки питающих трансформаторов, как правило, соединяются в треугольник, поэтому нейтральная точка физически отсутствует.

Большинство нарушений нормальной работы сетей с изолированной нейтралью связано с повреждением изоляции относительно земли и однофазным замыканием на землю. Для обеспечения максимально возможной надежности работы сети необходимо, чтобы ток замыкания был настолько незначителен, чтобы в течение достаточно длительного времени (необходимого для поиска и устранения повреждения) можно было бы обойтись без отключения потребителей.

Недостатки режима работы с изолированной нейтралью весьма существенны, а такое достоинство, как отсутствие необходимости отключения первого замыкания, весьма неоднозначно, так как всегда есть вероятность возникновения второго замыкания на другом присоединении из-за перенапряжений и отключения сразу двух кабелей, электродвигателей или воздушных линий. Именно по этой причине такие страны, как США, Канада, Англия, Австралия, Бельгия, Португалия, Франция и другие, отказались от режима изолированной нейтрали еще в 40 – 50-х годах прошлого века.

Способ заземления нейтрали через дугогасящий реактор также достаточно часто применяется в России. Этот способ заземления нейтрали, как правило, находит применение в разветвленных кабельных сетях промышленных предприятий и городов. При этом способе нейтральную точку сети получают, используя специальный трансформатор.

Этот способ также имеет ряд преимуществ и недостатков.

В России режим заземления нейтрали через дугогасящий реактор применяется в основном в разветвленных кабельных сетях с большими емкостными токами, а именно в городских сетях и в сетях промышленных предприятий. Кабельная изоляция, в отличие от воздушной, не обладает способностью к самовосстановлению. То есть, однажды возникнув, повреждение не устранится, несмотря на практически полное отсутствие тока в месте повреждения вследствие компенсации. Поэтому для кабельных

сетей самоликвидация однофазных замыканий как положительное свойство режима заземления нейтрали через дугогасящий реактор не реализуется.

При однофазном замыкании на землю в сети дугогасящий реактор создает в месте повреждения индуктивную составляющую тока, равную емкостной. При этом суммарный ток в месте повреждения становится равным практически нулю и первое однофазное замыкание на землю, которое возникает в сети, можно не отключать.

Режим заземления нейтрали через резистор используется в России довольно редко, только в некоторых сетях собственных нужд блочных электростанций и сетях газоперекачивающих компрессорных станций. В то же время в зарубежных странах резистивное заземление нейтрали является наиболее широко применяемым способом.

Заземление нейтрали через резистор имеет следующие достоинства, подтвержденные мировой практикой и опытом, полученным в России: необходимость в немедленного отключении однофазного замыкания на землю (только для высокоомного заземления нейтрали); отсутствие дуговых перенапряжений; достаточно несложная реализация построения релейной защиты; исключение феррорезонансных процессов и как следствие повреждений трансформаторов напряжения; снижение уровня дуговых; уменьшение вероятности поражения электрическим током оперативного персонала (при низкоомном заземлении нейтрали и быстром отключении) [2].

Недостатки резистивного заземления нейтрали следующие: увеличение тока замыкания на землю (максимум на 40%); появление на подстанции греющегося оборудования; необходимость отключения однофазных замыканий (только для низкоомного заземления нейтрали).

Режим заземления нейтрали в сети 6 - 35 кВ через резистор

На рис. 1 приведена типовая двухтрансформаторная подстанция с нейтралью на стороне 6 - 10 кВ, которая заземлена через высоковольтный резистор.

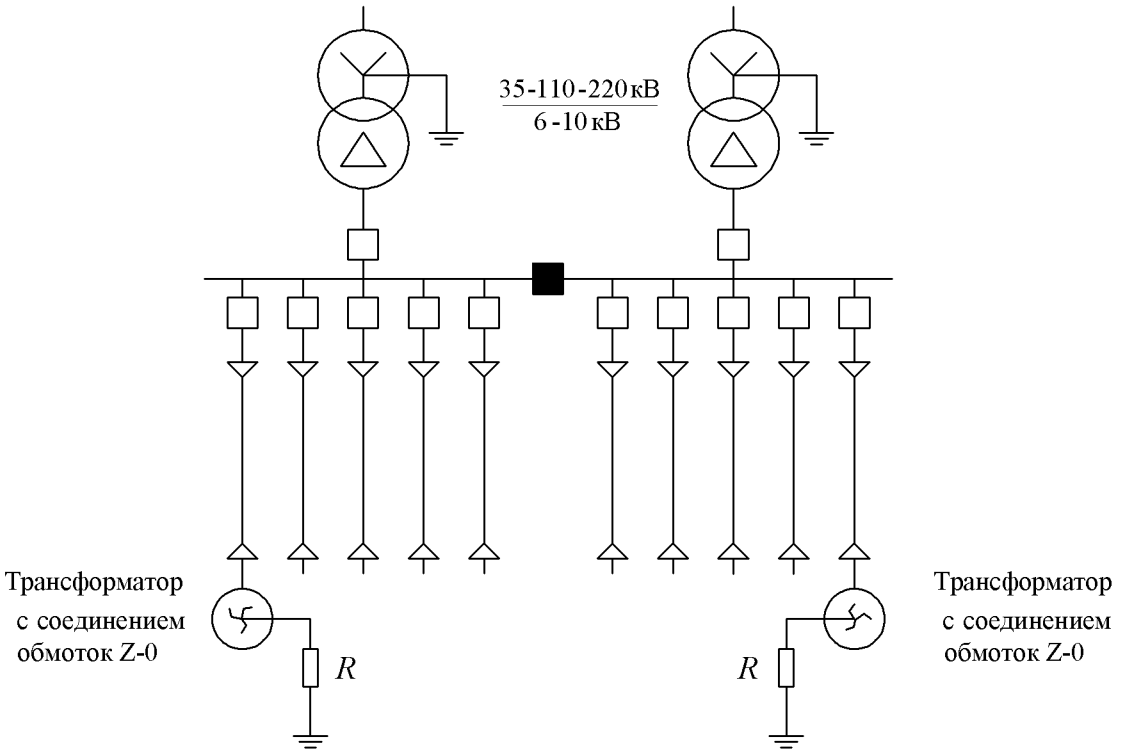


Рис. 1. Понижающая подстанция с нейтралью на стороне 6-10 кВ, заземленной через резистор.

В этом режиме на секцию шин 6-10 кВ через специально выделенную ячейку подключается трансформатор вывода нейтрали (с соединением обмоток Y-0/D или Z-0), в нейтраль которого включается резистор [2].

На рис. 2 приведены возможные варианты включения резистора в сеть. В основном, при

резистивном заземлении нейтрали используются схемы, изображенные на рисунках 2,а и 2,в. Вариант, представленный на рисунке 2,б используется достаточно редко, так как требует для своей реализации специального трансформатора [2].

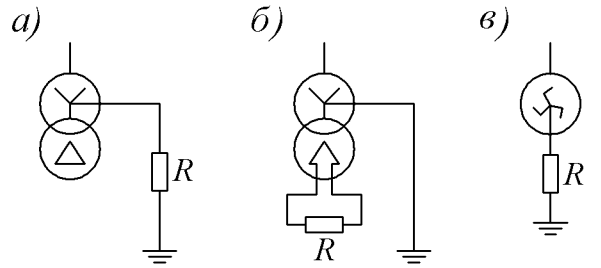


Рис. 2. Варианты включения резистора в сеть

Выбор типа резистора для заземления нейтрали производится по трем основным критериям:

- резистор должен обеспечивать снижение уровня дуговых перенапряжений;
- сопротивление резистора в нейтрали должно гарантировать протекание активного тока в поврежденном присоединении, достаточного для действия релейных защит на сигнал или на отключение поврежденного присоединения;
- при заземлении нейтрали через резистор должны соблюдаться условия электробезопасности для людей при однофазном замыкании на землю на подстанциях и распределительных пунктах с учетом существующего нормирования величины допустимого напряжения прикосновения.

Основной параметр резистора - его активное сопротивление, величина которого выбирается, исходя из снижения уровня перенапряжений.

Значение выбранного резистора впоследствии может корректироваться по условиям срабатывания релейной защиты и условиям электробезопасности.

Одним из критериев выбора резистора является снижение уровня перенапряжений. Расчетным путем и экспериментально установлено, что наибольшая эффективность защиты сетей от дуговых перенапряжений достигается в случае, когда активная составляющая тока замыкания $I_{зА}$, создаваемая резистором, больше суммарного емкостного тока сети $I_{За} > I_С$. Если это условия по определенным причинам выполнить сложно, то допускается при выборе сопротивления резистора использовать следующее условие $I_{За} > 0{,}5I_С$.

Следующим критерием выбора резистора является стабильность и надежность работы устройств релейной защиты и автоматики. Защита от однофазных замыканий на землю в сети обеспечивается на всех присоединениях.

Максимальная токовая защита нулевой последовательности с действием на отключение присоединений без выдержки времени используется при низкоомном резистивном заземлении нейтрали, максимальная токовая защита нулевой последовательности с действием на сигнал используется при высокоомном и при комбинированном резистивном заземлении нейтрали.

Селективность защит нулевой последовательности определяется тем, что активная составляющая тока однофазного замыкания на землю протекает только через поврежденное присоединение.

Тип резистора по критерию работы устройств релейной защиты и автоматики выбирается в соответствии с условием:

$$I_З > I_{СЗ},$$

где $I_З$ - ток замыкания на землю за вычетом емкостного тока рассматриваемого присоединения;

$I_{СЗ}$ - максимальный ток уставки защиты из всех присоединений.

Ток уставки защиты определяется по выражению:

$$I_{СЗ}=К_Н К_б I_{СП},$$

где $I_{СП}$ - первичный емкостный ток нулевой последовательности, который протекает по данному присоединению при однофазном замыкании на землю на данном присоединении;

$К_н$ - коэффициент надежности;

$К_б$- коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока при дуговых перенапряжениях.

Третий критерий выбора резистора сориентирован на обеспечение электробезопасности.

Заземление нейтрали через резистор имеет определенные достоинства, подтвержденные мировой и отечественной практикой. По сравнению с изолированной нейтралью при резистивном заземлении нейтрали в сетях 6 - 35 кВ: увеличивается ток однофазного замыкания на землю; снижается примерно в 1,5-2 раза уровень дуговых перенапряжений при однофазных замыканиях; уменьшается с нескольких часов до нескольких секунд продолжительность воздействия; повышается срок службы изоляции.

При заземлении нейтрали сетей 6-35 кВ через низкоомный резистор (в случаях однофазного замыкания на землю) поврежденное присо-

единение отключается, что ограничивает продолжительность воздействия перенапряжений на изоляцию.

В связи с этим снижается вероятность пробоя изоляции на неповрежденных присоединениях и соответственно общее число однофазных замыканий на землю, а также практически исключается возможность перехода однофазных замыканий в многофазные.

Расход внутреннего ресурса изоляции при воздействии импульсов перенапряжений в сети 6-35 кВ при резистивном заземлении нейтрали более чем в два раза ниже, чем в сети с изолированной нейтралью.

При этом уменьшается вероятность возникновения феррорезонансных явлений, что повышает надежность работы измерительных трансформаторов напряжения и снижает вероятность несрабатывания релейных защит при повреждениях элементов сети.

Резистивное заземление нейтрали приводит к более простому выполнению чувствительной и селективной релейной защиты от однофазных замыканий на землю, основанной на токовом принципе.

Недостатки резистивного заземления нейтрали следующие: увеличение тока замыкания на землю и появление на подстанции греющегося оборудования.

Существенным недостатком также являются дополнительные затраты на заземление нейтрали сетей 6 - 35 кВ через резистор.

Эти затраты включают проектирование перехода сети на режим нейтрали, заземленной через резистор; приобретение резистора и специального трансформатора для его включения, трансформаторов тока для нейтрали и всех отходящих линий, реле защиты, блоков питания схем защиты и автоматики; монтаж ячейки с трансформатором для подключения резистора; монтаж третьего трансформатора тока (если отсутствует трансформатор тока нулевой последовательности) на каждой из отходящих линий напряжением 6-10 кВ; монтаж и наладка устройств релейной защиты и автоматики.

Все режимы заземления нейтрали через резистор (резистивное заземление нейтрали) с точки зрения создаваемого активного тока можно разделить на следующие группы [1]:

– высокоомное резистивное заземление - это заземление нейтрали через резистор, при котором суммарный ток в месте замыкания (сумма активного тока резистора и емкостного тока сети) не превышает 10А. Однофазное замыкание на землю при таком способе заземления нейтрали можно не отключать и защиты от замыканий на землю действуют на сигнал.
– низкоомное резистивное заземление - это заземление нейтрали через резистор, при котором суммарный ток в месте замыкания (сумма активного тока резистора и емкостного тока сети) превышает 10 А. Обычно суммарный ток однофазного замыкания при этом способе заземления нейтрали значительно превышает 10 А и может достигать десятков и сотен ампер, что требует действия защит от замыканий на землю на отключение практически без выдержки времени.

Предполагается установка в нейтраль трансформаторов резисторов с большим или малым сопротивлением.

Низкоомное резистивное заземление нейтрали используется в тех случаях, когда необходимо отключить ОЗЗ в течение минимально допустимого времени. В этом случае ток в нейтрали должен иметь величину, достаточную для обеспечения срабатывания релейной защиты на отключение.

Высокоомное резистивное заземление нейтрали может выполняться только в сетях с емкостным током I_C, который составляет не более 5-7 А. При этом активный ток I_R, создаваемый резистором, должен быть больше емкостного тока сети:

$$I_C \le 5 - 7\ A;$$

$$I_C \le I_R.$$

При высокоомном резистивном заземлении нейтрали суммарный ток в месте повреждения складывается из емкостного тока сети и активного тока, создаваемого резистором заземления нейтрали:

$$I_{зам} = \sqrt{I_C^2 + I_R^2}.$$

Указанные активный и емкостный ток суммируются векторно и сдвинуты друг относительно друга на 90° (рис. 3).

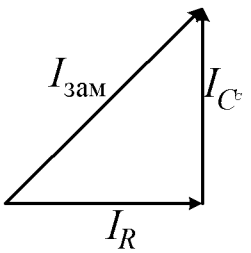


Рис. 3. Векторная диаграмма токов при однофазном замыкании в сети с резистивным заземлением

нейтрали.

При равенстве активного тока, создаваемого резистором, и емкостного тока сети суммарный ток в месте повреждения увеличивается в $\sqrt{2}$ раз. Так при емкостном токе сети величиной 5 А и активном токе 5 А, создаваемом резистором, суммарный ток в месте повреждения составит всего 7 А.

Низкоомное заземление нейтрали может выполняться в сетях с любым емкостным током, при этом активный ток I_R, создаваемый резистором, также должен быть больше емкостного тока сети. Как правило, активный ток, создаваемый резистором, превышает емкостный ток сети не менее чем в 2 раза.

Обычно, ток, создаваемый резистором при низкоомном резистивном заземлении нейтрали, находится в пределах: $I_R = 20 - 2000\ A$.

Выбор тока, создаваемого резистором при низкоомном заземлении нейтрали, определяется решением двух противоположных задач: повышением чувствительности защит от замыканий на землю за счет увеличения тока однофазного замыкания и ограничением тока однофазного замыкания для снижения объема разрушения оборудования [3].

До недавнего времени режим заземления нейтрали через резистор в России применялся лишь в отдельных случаях, несмотря на его значительные преимущества.

Значительные преимущества сетей с резистивным заземлением нейтрали определяют широкое использование этого режима за рубежом.

Недостатки резистивного заземления нейтрали, такие как увеличение тока в месте повреждения и необходимость отключения замыканий, преодолеваются за счет быстрого отключения поврежденного фидера и организации резервного питания потребителей.

Заключение

Применение резистивного заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ находит достаточно широкое применение в мировой практике, так как имеет ряд преимуществ по сравнению с изолированной и компенсированной нейтралью. В России этот способ также считается достаточно перспективным. Использование резистивного заземления дает возможность обеспечить достаточно высокую надежность и безопасность работы электрических сетей при однофазных замыканиях на землю. При эксплуатации, резистивно-заземленной нейтрали наблюдается снижение уровня перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю и подавление феррорезонансных явлений, вызывающих повреждения измерительных трансформаторов напряжения и неселективную работу защит, обеспечивается надежная работа релейной защиты, что позволяет селективно определить поврежденное присоединение и снижается аварийность от однофазных замыканий на землю.

В сетях среднего напряжения низкоомное заземление нейтрали с возможностью отключения поврежденных участков сети целесообразно применять в тех сетях, где обеспечена необходимая степень резервирования и автоматизации распределительных электрических сетей, систем электроснабжения и технологических процессов. В кабельных сетях с высокой степенью резервирования экономически и технически выгодно применение вместо компенсированной системы заземления нейтрали заземления через низкоомный резистор с отключением поврежденного присоединения без выдержки времени [2]. На подстанциях, которые в основном питают воздушные сети и не имеют высокой степени резервирования, необходимо устанавливать высокоомные резисторы, которые будут уменьшать уровни перенапряжений и время их воздействия. Резисторы можно устанавливать параллельно с дугогасящими реакторами. Особо благоприятна установка высокоомного резистора при высоком уровне напряжения смещения нейтрали, когда оно выше допустимого значения 15 % $U_ф$.

Однако, высокоомные резисторы имеют значительные габариты, массу и стоимость, что затрудняет их широкое использование. Также должны быть проведены дополнительные исследования и расчёты по выбору целесообразного режима нейтрали, предшествующего подключению низкоомного элемента [5].

В связи с вышеизложенным, в перспективе можно рекомендовать ограничение применения режима изолированной нейтрали в сетях 6-35 кВ и практически полное его исключение в кабельных сетях 6-10 кВ.

Список литературы

1. Правила устройства электроустановок. 7-е изд., перераб. и доп., 2016.
2. Назарычев А.Н., Пугачев А.А., Титенков С.С. Комплексные инновационные решения по заземлению нейтрали в сетях 6–35 кВ / Электроэнергия: передача и распределение. 2016. № 3(36).

3. Короткевич М.А. Эксплуатация электрических сетей. Минск: Вышэйшая школа 2014.
4. Ширковец А.И., Валов В.Н., Петров М.И. Задачи автоматического управления режимом компенсации тока замыкания на землю / Релейная защита и автоматизация. 2015. № 2.
5. Челазнов АА. Методические указания по выбору режима заземления нейтралей в сетях напряжением 6—10 кв. — Энергоэксперт, 2007, № 1, с. 60—67.

References

1. Rules for the installation of electrical installations. 7 th ed., Pererab. and additional., 2016.
2. Nazarychev A.N., Pugachev A.A., Titenkov S.S. Kompleksnyye innovatsionnyye resheniya po zazemleniyu neytrali v setyakh 6–35 kV / Elektroenergiya: peredacha i raspredeleniye. 2016. № 3(36).
3. Korotkevich MA Operation of electrical networks. Minsk: The High School in 2014.
4. Shirkovets A. I., Valov V. N., Petrov M. I. Problems of automatic control of the mode of compensation of earth fault current / relay protection and automation. 2015. No. 2.
5. Chelaznov AA. Methodical instructions for choosing the neutral grounding mode in networks of 6-10 kV. - Energoexpert, 2007, No. 1, p. 60-67.

УДК [621.31.031.016.3: 061.5]. 001.24

Моделирование дизель-генераторной установки с турбонаддувом двигателем постоянного тока

Ю.А. Майорова[1], А.К. Пронина[2], К.П. Путилин[3]
ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33 , г. Севастополь, 299053, Россия. [1]gaika20041983@mail.ru, [2]pronina-a@bk.ru, [3]putilin-kp39@mail.ru

Статья поступила 30.04.2018 г.; после доработки 11.05.2018 г.

Аннотация
Анализируются процессы динамики дизель-генераторных установок с турбонаддувом при использовании их в автономных электроэнергетических системах; выводятся дифференциальные уравнения, на основании которых решаются задачи математического и физического моделирования двигателя внутреннего сгорания (дизеля) двигателем постоянного тока с использованием подобия.

Ключевые слова: автономная электроэнергетическая система, дизель-генераторная установка с газотурбинным наддувом, математическое моделирование дизеля, двигатель постоянного тока, критерии подобия.

Simulation of turbocharged diesel generator set by direct current motor

J.A. Mayorova[1], A.K. Pronina[2], K.P. Putilin[3]
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]gaika20041983@mail.ru, [2]pronina-a@bk.ru, [3]pytilin-kp39@mail.ru

Received 30.04.2018 y.; received in final form 11.05.2018 y.

Abstract
The processes of dynamics of turbocharged diesel-generator sets are analyzed when used in Autonomous electric power systems; differential equations are derived on the basis of which the problems of mathematical and physical modeling of the internal combustion engine (diesel engine) by a DC motor with the use of similarity are solved.

Keywords: autonomous electric power system, diesel-generator set with gas turbine supercharging, mathematical modeling of a diesel engine, DC engine, similarity criteria.

Введение

В дизель-генераторных установках (ДГУ) автономных электроэнергетических систем (АЭЭС) широкое применение находят двигатели внутреннего сгорания (дизели) с газотурбинным наддувом [1]. За счёт газотурбонаддува достигается снижение массы и габаритов дизелей (до 30…40 %). Однако, при этом возникают проблемы качества переходных процессов, которые вызываются внезапными изменениями нагрузки на генераторе. Эти проблемы характерны для автономных электроэнергетических систем АЭЭС, по типу судовых систем, в которых существенный вес составляют мощные потребители, получающие электроэнергию от сети питания через статические преобразователи: выпрямители и инверторы [2]. Наличие в современных АЭЭС мощных преобразователей снижает в них качество электроэнергии, главным образом за счёт искажений синусоидальности напряжения (появления высших гармоник) и ухудшает коэффициент мощности ($cos\varphi$) [3].

Для улучшения гармонического состава напряжения в электрической системе и повышения коэффициента мощности используют так

называемые фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) [3]. Однако, эффективность ФКУ достигается только при точной настройке на частоту сети [4].

Применительно к судовым автономным ЭЭС это требование трудно обеспечить, если имеются мощные потребители электроэнергии, которые в соответствии с режимом их использования, подлежат частым подключениям и отключениям. К таким потребителям можно отнести гребные двигатели, подруливающие устройства, грузоподъемные механизмы, т.п. Ограниченная мощность источников электрической энергии в виде ДГУ является причиной возникающих при этом отклонении напряжения и частоты. Это, в свою очередь, резко снижает эффективность ФКУ, что и создает названную выше проблему, так как отклонения частоты в СЭЭС, согласно требованиям Морского Регистра [5], допускаются до ± 10% (± 5 Гц), что совершенно неприемлемо для чувствительных к качеству электрической энергии по частоте потребителей и в особенности для ФКУ.

Формулировка задачи

Для уяснения физической стороны проблемы, приведем анализ работы системы автоматического регулирования дизелей с газотурбинным наддувом, рис. 1.

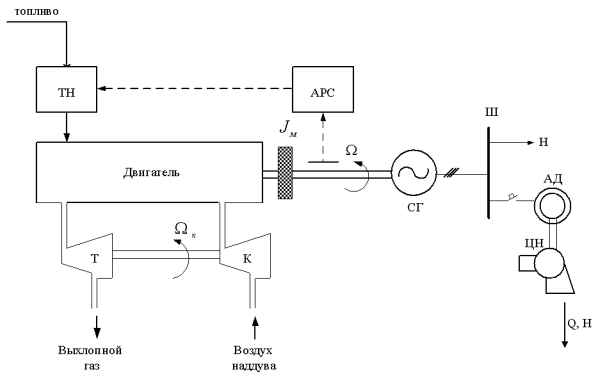


Рис. 1. Структурная схема системы ДГУ с автоматическим регулированием и навешенным маховиком $J_н$

При набросе нагрузки P на генератор СГ, при подключении, например асинхронного двигателя АД, на валу дизель генератора возникает тормозной момент, направленный встречно вращению Ω. Момент нагрузки, пропорциональный мощности P, вызывает снижение скорости Ω и, как следствие, пропорциональное уменьшение частоты $f \equiv \Omega$.

На рис. 2 приведены характерные по виду графики изменения скорости дизеля с ГТН при сбросе и набросе нагрузки [1].

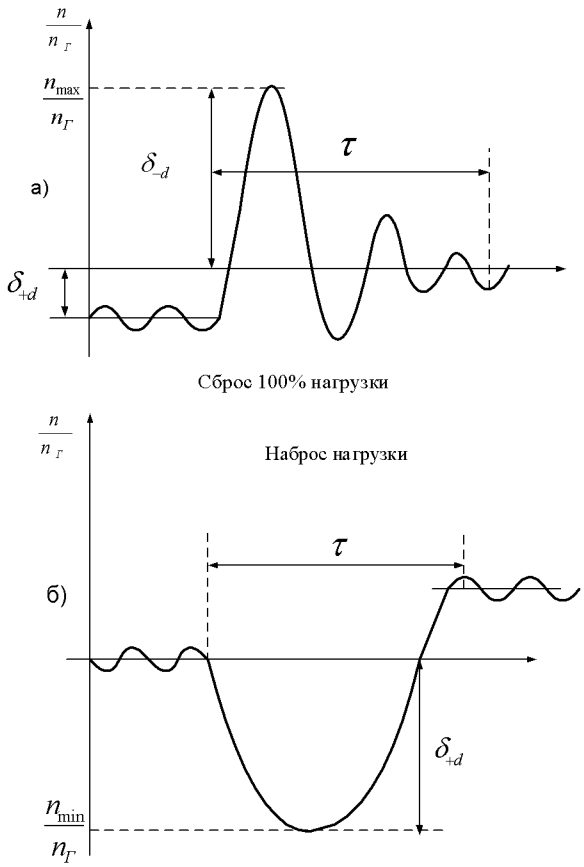


Рис. 2. Графики изменения скорости при сбросе нагрузки а) и набросе нагрузки б)

Такие же графики будут определять и изменения частоты генератора. Малые колебания скорости в установившемся режиме происходят за счет остаточной неравномерности вращения из-за импульсного характера момента дизеля. Уменьшение установившегося значения скорости при увеличении нагрузки характеризуются статизмом пропорционального регулятора.

Эти отклонения обычно составляют значения $\delta_{ст}$ = 0,03…0,06, и сводятся к нулю за счёт действия изодромной обратной связи [6].

Целью исследования является обоснование пути уменьшения предельных отклонений скорости в переходных режимах, вызываемых внезапными изменениями нагрузки на дизель-генератор. Для достижения цели предполагается сформулировать задачу математического моделирования с учетом корректных допущений, а также обосновать возможность построения физической модели ДГУ с ГТН, путем замены дизеля двигателем постоянного тока, параметры которого подбираются на основании критериев

подобия. Модели затем могут использоваться для проведения всесторонних исследований.

Для определения изменения скорости дизеля в переходных режимах будем использовать уравнение моментов, которое имеет вид

$$M_Д - M_C = J\frac{d\omega}{dt}, \qquad (1)$$

где J – приведенный к валу момент инерции двигателя и связанных с ним агрегатов, а также ротора генератора;

ω – угловая скорость вала дизеля;

$M_Д$, M_C – движущий момент и момент сопротивления на валу дизеля.

Движущий момент дизеля зависит от управления и положения органа рейки топливного насоса h, угловой частоты вращения ω, а также от скорости вращения турбокомпрессора $\omega_к$.

Момент сопротивления зависит от мощности нагрузки генератора Р и частоты вращения ω. Таким образом, можно записать:

$$\left.\begin{aligned} M_Д &= f(h,\omega,\omega_к);\\ M_C &= M_Г = f(P,\omega). \end{aligned}\right\} \qquad (1, а)$$

Функциональные зависимости $M_д$ и $M_с$ нелинейны, однако в случае малых отклонений от установившегося режима допустимо эти зависимости представить линейными функциями, полученными после разложения исходных функций в ряд Тейлора и отбрасывания всех составляющих второго и высших порядков малости. С того момента, когда под действием редуктора скорости подача топлива изменится, переход к новому установившемуся режиму дизеля будет происходить постепенно с изменением количества нагнетаемого в цилиндры воздуха, то есть по мере преодоления тепловой и механической инерции нагнетателя (турбокомпрессора).

Дифференциальное уравнение вращения вала дизеля с ГТН (1) должно быть дополнено уравнением вращения вала турбокомпрессорного агрегата

$$J_К\frac{d\omega_к}{dt} = M_{ТК} - M_К \qquad (2)$$

где $J_к$ – момент инерции ротора турбины и компрессора;

$\omega_к$ - угловая скорость компрессора;

$M_{т.к.}$ – вращающий момент турбины компрессора;

$M_к$ – момент сопротивления на валу турбины (или момент на валу компрессора).

Вращающий момент дизеля $M_Д$ зависит: от смещения рейки топливного насоса h, угловой скорости вращения вала ω (от нее зависит подача топлива при заданном h) и угловой скорости вращения компрессора $\omega_к$, так как последняя определяет весовой заряд воздуха, подаваемого в цилиндры дизеля.

Вращающий момент газовой турбины $M_{т.к.}$ зависит от количества выхлопных газов и в конечном счете определяется количеством топлива, подаваемого в цилиндры дизеля (то есть положением рейки топливного насоса) и весовым зарядом воздуха, зависящим от угловой скорости $\omega_к$

$$M_{т.к.} = M_{т.к.}(h,\omega_к). \qquad (2, а)$$

Момент сопротивления на валу компрессора зависит только от угловой скорости вращения $\omega_к$, то есть

$$M_к = M_к(\omega_к). \qquad (2, б)$$

Для малых отклонений от некоторого статического режима можно записать уравнение для двигателя (3)

$$J\frac{d(\omega-\omega_0)}{dt} = \left(\frac{\partial M_Д}{\partial h}\right)_0(h-h_0) + \left(\frac{\partial M_Д}{\partial \omega_k}\right)(\omega-\omega_0) - \left[\left(\frac{\partial M_Г}{\partial \omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_Д}{\partial \omega}\right)_0\right](\omega-\omega_0) - \left(\frac{\partial M_Г}{\partial P}\right)_0(P-P_0), \qquad (3)$$

а для турбокомпрессора (4)

$$J_К\frac{d(\omega_к-\omega_0)}{dt} = \left(\frac{\partial M_{ТК}}{\partial h}\right)_0(h-h_0) - \left[\left(\frac{\partial M_К}{\partial \omega_k}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_{ТК}}{\partial \omega_К}\right)_0\right](\omega_к-\omega_{К.0}). \qquad (4)$$

Эти уравнения могут быть записаны в относительных единицах. За базовые значения параметров принимаем номинальные величины $M_н$, $P_н$, $\omega_н$ для дизеля, и $M_к$, $\omega_к$ для компрессора.

Для относительных величин вводятся обозначения:

$$\frac{\omega-\omega_0}{\omega_н} = \varphi;\ \frac{h-h_0}{n_н} = \xi_c;\ \frac{P-P_0}{P_н} = \lambda;$$

$$\left[\left(\frac{\partial M_Г}{\partial \omega}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_Д}{\partial \omega}\right)_0\right]\frac{\omega_н}{M_н} = \beta_c,$$

где β_c - коэффициент саморегулирования дизеля;

$$\frac{J\cdot\omega_н}{M_н} = \frac{J\cdot\omega^2{}_н}{P_н} = T_a$$

T_a -постоянная инерции дизель генератора.

$$\nu = \left(\frac{\partial M_Д}{\partial h}\right)_0 \cdot \frac{h_н}{M_н};\ \nu_Г = \left(\frac{\partial M_Г}{\partial P}\right)_0 \cdot \frac{P_н}{M_н},$$

где ν - коэффициент турбокомпрессора (индекс *к*) используем аналогичные обозначения переменных и коэффициентов: $\varphi_к$, $\beta_к$, $T_{ак}$ – постоянная инерции компрессора

$$\beta_{с.к.} = \frac{\partial M_Д}{\partial \omega_к} \cdot \frac{\omega_{к.н.}}{M_н}$$

$\beta_{с.к.}$ - коэффициент пропорциональности вращающего момента дизеля отклонению скорости вращения турбонагнетателя $\omega_к$;

$$\nu_к = \left(\frac{\partial M_{Т.к.}}{\partial h}\right)_0 \cdot \frac{h_н}{M_н}$$

$\nu_к$ - коэффициент пропорциональности вращающего момента газовой турбины нагнетателя отклонению рейки топливного насоса дизеля от установившегося положения.

Для принятых обозначений система уравнений (3-4) примет вид

$$\left.\begin{aligned} &T_a \cdot \dot{\phi} + \beta_c \cdot \phi - \beta_{с.к.} \cdot \phi_к = \nu \xi_c - \lambda; \\ &Так\ \dot{\phi}_к + \beta_{к.} \cdot \phi_к = \nu_к \xi_c. \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

Эти формулы являются приближенными, так как не учитывают фактор инерции процесса сгорания топлива при малых значениях коэффициента избытка воздуха, что относится в основном ко второму уравнению (5). Тем не менее, они широко используются с различными дополнительными уточнениями, например, при увеличении постоянной времени.

Так систему уравнений (5) можно привести к уравнению второго порядка относительно φ и $\dot{\varphi}$

$$\begin{aligned} &T_a \cdot T_{ак} \ddot{\varphi} + (\beta_c + \beta_к \cdot T_a)\dot{\varphi} + (\beta_к \cdot \beta_c) \cdot \varphi = \\ &= \nu \cdot \xi_c \cdot \beta_к - \lambda \cdot \beta_к + \nu_к \cdot \xi_c \cdot \beta_{ск} \end{aligned} \quad (6)$$

Графики изменения скорости дизеля при сбросе и набросе нагрузки на генератор (рис. 2) вполне соответствуют виду уравнения (5).

Для поставленной цели задачей является определение максимального отклонения скорости φ_m от установившегося значения. Собственное движение дизеля без возмущения получим, если правую часть положим равной нулю.

Правая же часть уравнения (6) содержит два вида возмущений: управляющего воздействия, то есть регулятора, и последние слагаемые справа – внешнее возмущение в виде нагрузки на генератор.

Рассмотрим возможность моделирования дизеля с ГТН с помощью двигателя постоянного тока.

Уравнение двигателя постоянного тока при постоянном магнитном потоке имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} &U(t) = i(t) \cdot R + e(t) + (L_a + L_d)\frac{di(t)}{dt}; \\ &M(t) = J\frac{d\omega}{dt} + \frac{\Delta P(t)}{\omega}, \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

где:

$$\left.\begin{aligned} &M(t) = k\Phi \cdot i(t) = c \cdot i(t); \\ &e(t) = k\Phi \cdot \omega(t) = c \cdot \omega(t). \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

Параметрами режима являются:

– напряжение на якоре, которое в общем случае может быть функцией времени *U(t)*;
– ЭДС вращения *e(t)*, и трансформаторная ЭДС *Ldi/dt*;
– скорость *ω(t)* вала двигателя;
– мощность нагрузки *P(t)*.

Коэффициенты уравнений:

- *J* - суммарный момент инерции двигателя и нагрузки (генератора);
- $L = L_a + {}_{Ld}$ - индуктивность цепи якоря и дополнительная индуктивность.

Уравнения системы (6), приведенное к одному уравнению второго порядка аналогичны уравнению дизель-генератора с ГТН:

$$\begin{aligned} &\frac{LJ}{C^2}\ddot{\omega} + \frac{JR}{C^2}\dot{\omega} + \omega = \\ &= \frac{1}{C}U - \left(\frac{L}{C^2} \cdot \frac{dM_c}{dt} + \frac{R}{C^2}M_c\right); \end{aligned} \quad (9)$$

Момент сопротивления $M_с$ нагрузки генератора в общем случае зависит от времени. Примером нагрузки, зависящей от времени является асинхронный двигатель в режиме пуска.

Обратимся к графику механической характеристики $M_Д(\omega)$ АД, рис. 3.

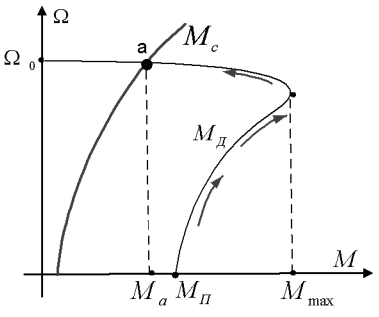


Рис. 3 Механическая характеристика АД для демонстрации зависимости

Момент нагрузки изменяется по кривой, обозначенной стрелками, а мощность, поступающая в двигатель, от генератора определяется произведением

$$P(t) = M \cdot \Omega(t) ,$$

где $\Omega(t)$ - изменение скорости во времени при разгоне двигателя [7].

Коэффициенты уравнения (9) имеют размерность постоянной времени:

$$\frac{LJ}{C^2} = \frac{L}{R} \cdot \frac{JR}{C^2} = T_Э \cdot T_j \qquad (10)$$

при этом $\frac{L}{R} = T_э$ - электромагнитная постоянная времени цепи якоря:

$$\frac{JR}{C^2} = \frac{JR}{\left(U_H/\Omega_0\right)^2} = \frac{J\Omega_0^2}{U_н \cdot U_н/R} =$$

$$= \frac{J\Omega_0^2}{U_н \cdot I_k} = \frac{J\Omega_0^2}{P_н} \cdot \frac{1}{k_{iП}} = T_j$$

T_j - постоянная инерции (k_i- кратность тока прямого включения двигателя на напряжение $U_Н$), также имеющие размерность времени.

С учетом (10) дифференциальные уравнения двигателя постоянного тока, принимает вид:

$$T_Э \cdot T_j \cdot \ddot{\omega} + T_j \cdot \dot{\omega} + \omega =$$

$$= \frac{1}{C}U - \frac{1}{C^2}\left(L\frac{dM_c}{dt} + RM_c\right) \qquad (11)$$

Для использования уравнения (11) в качестве математической модели дизеля (оригинала) с ГТН, необходимо определить коэффициенты подобия [7]. Схема оригинала – ДГУ с ГТН, и физической модели в виде ДПТ в приводе СГ показана на рис. 4

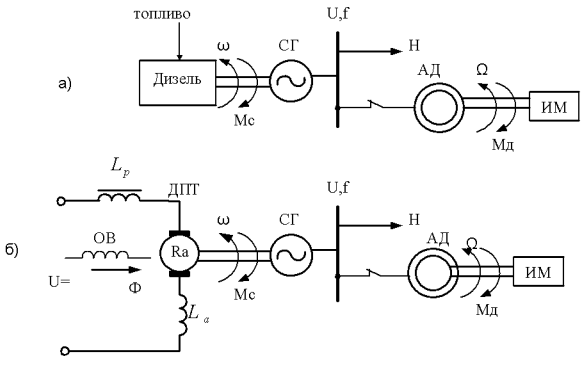


Рис.4 Схема установки ДГУ с первичным двигателем - дизелем при пуске АД от СГ а) схема физической модели ДГУ с первичным двигателем – ДПТ при пуске АД от СГ б)

Заключение

Математическое моделирование дизель-генераторной установки с газотурбинным наддувом дифференциальным уравнением второго порядка показывает возможность моделирования дизеля двигателем постоянного тока.

Разрабатываемая на ее основе физическая модель ДГУ с ГНТ позволяет исследовать динамику и способы улучшения качества переходных процессов, возникающие при внезапных изменениях нагрузки на генератор.

При этом целью является ограничения предельных отклонений частоты генератора в данных режимах.

Одним из путей такого ограничения провалов и забросов частоты может рассматриваться вариант навешивания на вал дизель-генератора дополнительной инерционной массы в виде маховика, рис.1, с моментом инерции $J_Н$.

Математическое и физическое моделирование переходных процессов и их исследование с большой эффективностью может быть использовано в учебном процессе при подготовке и повышении квалификации судовых электромехаников.

Список литературы

1. Малыш А.Н. Математическая модель дизель-генератора с турбонаддувом (проф.Кононов Б.Т.) ИССН 1681-7710.Системы обработки информации. Выпуск №1 2004 С.219-С.224.
2. Анисимов Я.Ф. Электромагнитная совместимость полупроводниковых преобразователей и судовых электроустановок /Я.Ф. Анисимов, Е.П. Васильев. - Л.: Судостроение, 1990. – 264с.
3. Жежеленко И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях И.В. Жежеленко. – 3-е изд., доп. - М.: Энергоатомиздат, 2000. - 190с.
4. Запальский В.Н. Влияние отклонения напряжения и частоты на качество электроснабжения морского подвижного объекта / В.Н. Запальский, К.Н. Запальский //Вестник - Энергетика и энергоресурсосжбережение: сб. науч. тр. / КДПУ им. Михайло Остроградского, 2009. - Вып.3(56). – С. 187-190.
5. Морской Регистр судоходства. - Правила классификации и постройки морских судов. – М.: Том 2. Часть XI Электрооборудование. Общие требования. п.2.1.3., п.2.2.1.3. Допустимые отклонения параметров питания, 2016. – 387с.
6. Крутов В.И. Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания. М.: Машиностроение, 1968. - 535с.
7. Веников В.А. Физическое моделирование элек-

трических систем /В.А. Веников, А.В. Иванов-Смоленский. М-Л.: Изд-во ГЭИ, 1956. – 359с.

Bibliography

1. Malysh A.N. Mathematical model of a diesel generator with a turbo-supercharging (prof. Kononov BT) ISSN 1681-7710. Information processing systems. Edition №1 2004 C.219-C.224.
2. Anisimov Ya.F. Electromagnetic Compatibility of Semiconductor Converters and Ship Electrical Installations. Anisimov, E.P. Vasiliev. - L.: Shipbuilding, 1990. - 264p.
3. Zhezhelenko I.V. Indicators of power quality and their control in industrial enterprises Zhezhelenko. – 3 publ., suppl., Ext. - Moscow: Energoatomizdat, 2000. – 190p.
4. Zapalsky V.N. Influence of voltage and frequency deviation on the quality of power supply of a marine mobile object. Zapal'sky, K.N. Zapal'skii // Vestnik - Energetika i energy saving resource: sb. sci. tr. / KDPU them. Mikhailo Ostrogradsky, 2009. – Edition № 3 (56). - P. 187-190.
5. Maritime Register of Shipping. - Rules for the classification and construction of sea-going vessels. - M: Volume 2. Part XI Electrical equipment. General requirements. paragraph 2.1.3., paragraph 2.2.1.3. Permissible deviations of power parameters, 2016. – 387p.
6. Krutov V.I. Automatic control of internal combustion engines. M.: Mechanical Engineering, 1968. – 535p.
7. Venikov VA Physical modeling of electrical systems / VA. Venikov, A.V. Ivanov-Smolensky. ML: Publishing house SEI, 1956. - 359p.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.316.718

Повышение эффективности городского электротранспорта на основе использования энергии рекуперации

Л. Н. Канов[1], А.В. Солодкий, А.А. Пронин
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]*lnkanov48@mail.ru*

Статья поступила 11.04.2018 г.; после доработки 16.04.2018 г.

Аннотация

Построено математическое описание режима рекуперации тягового асинхронного электропривода городского электротранспорта в виде системы нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений. Определены параметры роторов рекуперационных гиромоторов для накопления энергии рекуперации. Выполнено математическое моделирование процесса движения электротранспорта под уклон, сделана оценка количества энергии рекуперации.

Ключевые слова: тяговый асинхронный электропривод, математическое моделирование, скорость платформы, вращающий момент, энергия рекуперации, движение под уклон.

Increase of Efficiency of City Electrotransport on the Basis of the Use of Recuperation energy

L.N. Kanov[1], A.V. Solodkiy, A.A. Pronin
Sevastopol State University, 33 Universitetskaua st., Sevastopol, 299053, Russia
[1]*lnkanov48@mail.ru*

Received 11.04.2018 y.; received in final form 16.04.2018 y.

Abstract

Mathematical description of the mode of recuperation of hauling asynchronous electromechanic of city electrotransport is built as a system of nonlinear algebraic and differential equalizations. The parameters of recuperativ giromotors rotors are certain for the accumulation of energy of recuperation. The mathematical design of process is executed motion of electrotransport down grade, the estimation of amount of energy of recuperation is done.

Keywords: hauling asynchronous electromechanic, mathematical design, speed of platform, rotary-type a moment, energy of recuperation, motion down grade.

Введение

Тяговые частотно – регулируемые электроприводы переменного тока постепенно вытесняют приводы постоянного тока. Преимущества асинхронных короткозамкнутых двигателей по сравнению с двигателями постоянного тока, такие как повышенная надежность, меньшая стоимость, простота изготовления и эксплуатации в сочетании с высокими регулировочными и динамическими показателями превращают асинхронный частотно – регулируемый электропривод в доминирующий тип тягового электропривода. Применение подобного тягового электропривода решает не только технологические задачи, но и проблему энергосбережения [1, 2].

В силу принципа обратимости [3] асинхронный двигатель может работать в режиме генератора. Для этого следует увеличить ско-

рость вращения ротора, чтобы она стала больше скорости идеального холостого хода. Подобный режим возникает при движении электротранспорта под уклон, когда к платформе прикладывается дополнительная сила, которая ускоряет движение платформы.

Скольжение асинхронного двигателя становится отрицательным, а момент на валу двигателя – тормозящим. Двигатель преобразовывает механическую энергию в электрическую, которая и будет передаваться в контактную сеть.

На тяговой подстанции постоянного тока энергия рекуперации может передаваться или в питающую систему электроснабжения, для чего постоянный ток должен быть преобразован в трехфазный переменный, или погашена в специальных поглощающих устройствах. Эти устройства представляют ящики сопротивлений, рассчитанных на ток 100 – 150 А и рассеивающих избыточную энергию.

Для передачи энергии рекуперации в питающую систему применяются выпрямительно – инверторные агрегаты, которые могут работать как в выпрямительном, так и в инверторном режимах [4, 5]. Так как количество возвращаемой энергии сравнительно невелико, установка инверторных агрегатов зачастую не окупается за приемлемый срок, а переоборудование тяговых подстанций дорого, целесообразно накопление этой энергии непосредственно в движущемся электротранспорте.

В таком случае энергия может накапливаться в аккумуляторах или ионисторах. Однако, для этого требуются ионисторы большой емкости, рассчитанные на номинальные напряжения тяговых электродвигателей. Более предпочтительным является использование гиромоторного рекуператора, который накапливает избыточную энергию в механической форме. Для этого ротор гиромотора раскручивается за счет поступления избыточной электроэнергии до большой скорости. Накопленная кинетическая энергия затем используется при трогании с места и разгоне транспортного средства.

Целью статьи является исследование и оценка возможности рекуперации энергии тяговых асинхронных двигателей и использование ее для повышения эффективности городского электротранспорта.

Режимы рекуперации асинхронного электропривода

Рассмотрим рекуперацию энергии при движении транспортного средства под уклон, когда на асинхронный двигатель действует ускоряющий момент. Напряжение питания на асинхронный двигатель поступает от контактной сети через силовой трехфазный инвертор напряжения, обеспечивающий необходимую частоту напряжения питания двигателя. Выполним анализ режима на основании Т – образной схемы замещения двигателя [3], рис.1.

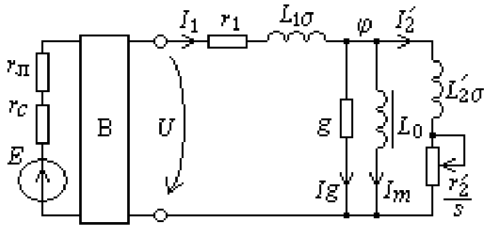


Рис. 1. Схема замещения тягового двигателя.

На рисунке обозначены: $L_{1\sigma}$, $L'_{2\sigma}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; r_1, r'_2 – сопротивления обмоток статора и ротора; g – проводимость потерь в стали; L_m – индуктивность намагничивания; E – источник постоянного напряжения питающей подстанции; r_c – эквивалентное внутреннее сопротивление; $r_Л$ – сопротивление проводов контактной сети; B – выпрямитель – инвертор.

Для полученной цепи применим метод узловых потенциалов [3]: $\underline{Y}\phi = \dot{I}_y$, где

$$\underline{Y} = \frac{1}{r_c + r_Л + r_1 + j\omega L_{1\sigma}} + g + \frac{1}{j\omega L_m(\varphi)} + \frac{1}{\frac{r'_2}{s} + j\omega L'_{2\sigma}}$$

собственная проводимость узла;

$$\dot{I}_y = \frac{\dot{E}}{r_c + r_Л + r_1 + j\omega L_{1\sigma}}$$ – узловой ток.

Для анализа режима асинхронного двигателя необходимо найти лишь модуль ЭДС $|\phi| = \varphi$, так как индуктивность намагничивания и момент двигателя зависят только от модуля ЭДС.

Поэтому последнее уравнение запишем для квадратов модулей правой и левой частей

$$\left[(\mathrm{Re}\underline{Y})^2 + (\mathrm{Im}\underline{Y})^2\right] \cdot \varphi^2 = \frac{E^2}{(r_c + r_Л + r_1)^2 + (\omega L_{1\sigma})^2}.$$

Таким образом, с учетом зависимости $L_m(\varphi)$ последняя формула представляет нелинейное алгебраическое уравнение относительно

φ, которое следует решать на каждом шаге моделирования работы асинхронного двигателя. Это уравнение дополняется уравнением вращения электропривода

$$J\frac{d\Omega}{dt}+M_H=M,$$

где M_H – момент нагрузки;

J – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции механизма электропривода.

Для оценки режима асинхронного двигателя рассмотрим тяговый двигатель мощностью 180 кВт с типичными параметрами: $r_1=0{,}085$ Ом; $g=0{,}01$ См; $r_2'=0{,}099$ Ом; $L_{1\sigma}=L_{2\sigma}'=0{,}477$ мГн; $L_{т\ ном}=15$ мГн; $p=2$; $m_{ном}=15\cdot10^3$ кг; $M_{ном}=1150$ Н·м; $S=0{,}025$; $\Omega_{ном}=153{,}45$ 1/с; $J_{прив}=118$ кг·м^2; ЭДС $\varphi_{ном}=530$ В; $U_{ном}=560$ В; $I_{ном}=171$ А.

Расчет при движении по дороге без уклона при напряжении питания $E=570$ В, частоте 314 1/с и $r_c=0{,}035$ Ом, $r_Л=0{,}05$ Ом показал, что скорость вращения составляет 153,45 1/с (50 км/час) при радиусе колеса 0,5 м и коэффициенте передачи редуктора 5,64; момент $M=1178$ Н·м; $I_1=171{,}23$ А; $P_{мех}=180{,}8$ кВт; $P_{эл}=208{,}8$ кВт; $S=0{,}023$; $\varphi=531{,}2$ В.

Для оценки возможности рекуперации полагаем, что платформа движется под уклон, что дает дополнительный момент 4500 Н·м в течение 2,75 с. На рис.2 изображены графики мощностей двигателя, а также мощность рекуперации. Рис. 2. показывает, что за время рекуперации вырабатывается энергия около 0,3 кВт·час.

Оценим возможность рекуперации при торможении, когда движение происходит по ровной дороге без уклона. В этом случае дополнительный момент рельефа равен нулю. С помощью инвертора частота напряжения на двигателе снижается, при этом скорость вращения двигателя уменьшается, момент и скольжение меняют знак.

На рис. 3 изображены рассчитанные графики параметров режима торможения при уменьшении частоты по линейному закону в течение двух секунд. Рис.3 показывает, что снижение частоты приводит к соответствующему снижению скорости вращения двигателя, причем снижение скорости в силу большой инерции транспортного средства происходит медленнее, чем снижение частоты напряжения.

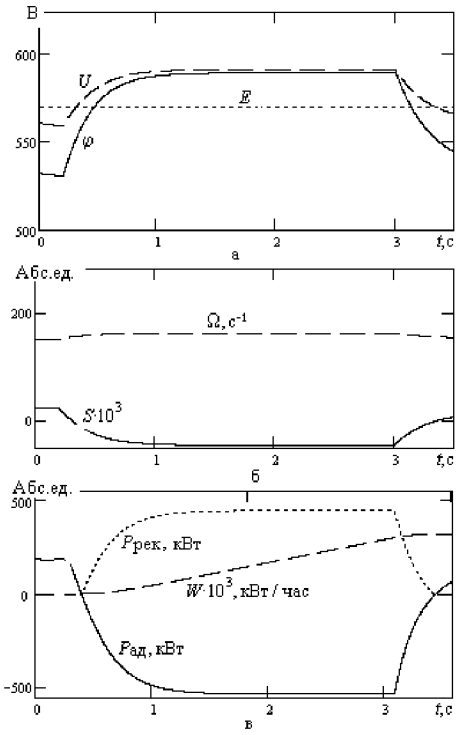


Рис. 2. Режим двигателя при движении под уклон с неизменной частотой инвертора:
а) напряжение на двигателе и ЭДС; б) частота вращения и скольжение; в) мощность двигателя и энергия рекуперации.

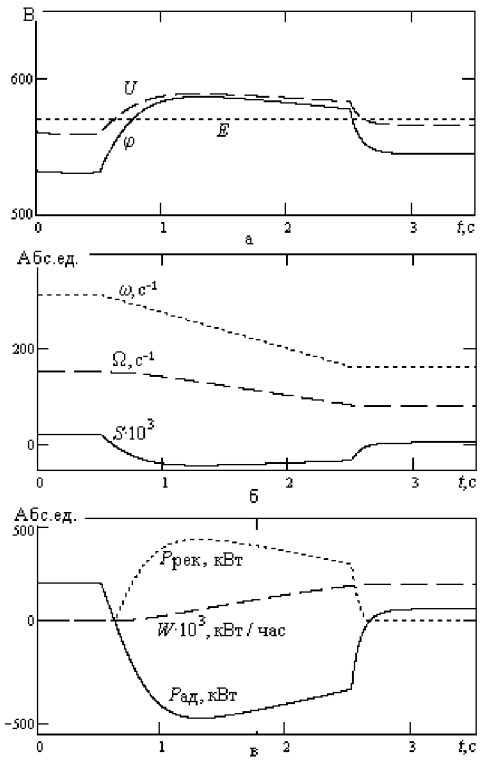


Рис. 3. Тормозной режим при движении по ровной дороге со снижающейся частотой инвертора:
а) напряжение на двигателе и ЭДС; б) частота и скольжение; в) мощность двигателя и энергия рекуперации.

Поэтому скольжение становится отрицательным, и тормозящий момент двигателя достигает −4 кН·м. Торможение сопровождается увеличением напряжения на двигателе до 600 В и превышает напряжение на линии.

Процесс рекуперации энергии происходит так же, как и при движении под уклон.

Отрицательная механическая мощность достигает величины − 420 кВт, а мощность рекуперации 400 кВт. За время торможения в сеть возвращается около 0,18 кВт·час электроэнергии. Ток двигателя приближается к величине 300 А.

Рассмотрим движение платформы под уклон, когда питающий инвертор не определяет изменение частоты, а для возврата энергии в сеть служит неуправляемый выпрямитель. Эквивалентная однолинейная схема асинхронного двигателя изображена на рис. 4, на котором обозначена дополнительная емкость C, необходимая для перехода асинхронного двигателя в генераторный режим, r_H – эквивалентное сопротивление выпрямителя и контактных проводов.

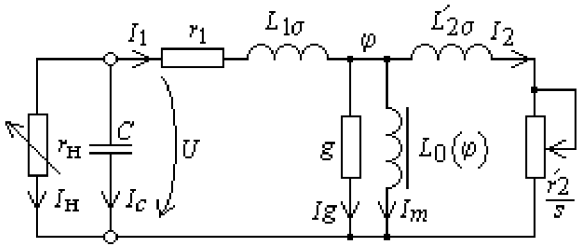


Рис.4. Схема замещения асинхронного двигателя в режиме генератора.

Основное расчетное уравнение в этом случае становится однородным, так как напряжение сети не поступает на двигатель (выпрямитель заперт): $\underline{Y}\varphi = 0$ или

$$\left[\left(r_1 + j\omega L_{1\sigma} + \frac{r_H}{1 + j\omega r_H C}\right)^{-1} + g + \frac{1}{j\omega L_m(\varphi)} + \left(\frac{r_2}{S} + j\omega L'_{2\sigma}\right)^{-1}\right] \cdot \dot{\varphi} = 0 .$$

Так как потенциал φ не равен нулю, то, следовательно, собственная проводимость узла равна нулю $\underline{Y} = \mathrm{Re}\underline{Y}(j\omega) + j\,\mathrm{Im}\underline{Y}(j\omega,\varphi) = 0$. Равенство нулю вещественной части собственной проводимости дает уравнение для определения частоты ЭДС, наводимой в двигателе. Равенство нулю мнимой части собственной проводимости дает уравнение для определения модуля потенциала узла φ.

Полученные уравнения позволяют моделировать процесс самовозбуждения асинхронного двигателя в режиме асинхронного генератора. Процесс рекуперации возникает тогда, когда напряжение на зажимах двигателя под влиянием потенциала φ начнет превышать напряжение на линии E. В этом случае выпрямитель открывается, и в линии возникает ток рекуперации.

На рис.5 представлены результаты моделирования процесса рекуперации, рассчитанные при величине емкости 800 мкФ и учете эквивалентного сопротивления нагрузки $r_H = 15$ Ом.

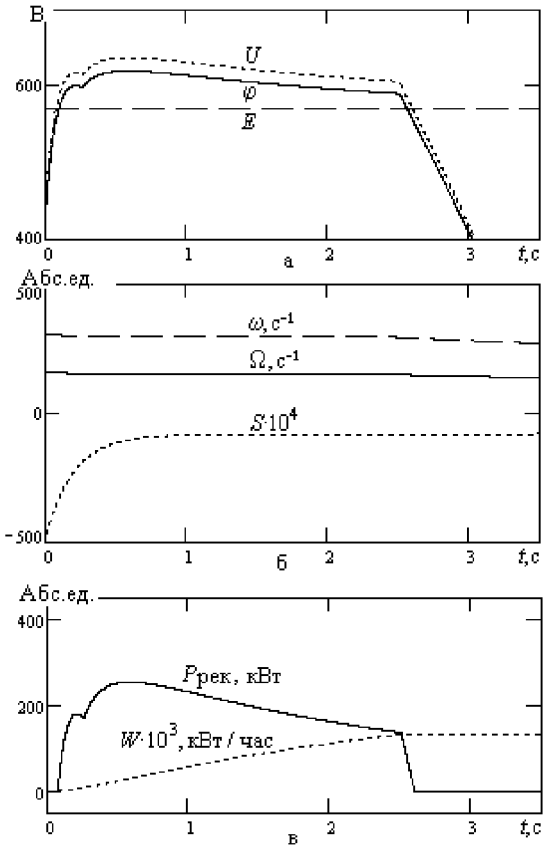


Рис.5. Работа двигателя в режиме асинхронного генератора при движении под уклон:
а) напряжение на двигателе и ЭДС;
б) частота и скольжение;
в) мощность и энергия рекуперации.

Дополнительный момент при движении под уклон составляет 1,78 кН·м и уравновешивается моментом нагрузки 1,1 кН·м и отрицательным моментом асинхронного двигателя 0,8 кН·м.

Частота вырабатываемого напряжения асинхронного двигателя в режиме автономного асинхронного генератора постепенно снижается, также снижается и скорость вращения. Вследствие инерционности скорость вращения снижается медленнее, скольжение становится отрицательным и находится на уровне 0,01. Напряжение на выводах выходного рекуперационного выпрямителя достигает 650 В и значительно превышает напряжение контактной сети. Вследствие этого возникают значительный ток рекуперации до 400 А и мощность рекуперации до 250 кВт. За две секунды в контактную сеть возвращается 0,12 кВт·час электроэнергии. После окончания действия дополнительного момента процесс рекуперации прекращается.

Группа транспортных средств в режиме рекуперации

Эффективным средством накопления энергии рекуперации помимо сброса ее в сеть является применение массивного гиромоторного рекуператора. При превышении напряжением на контактах выходного выпрямителя напряжения сети напряжение с выпрямителя подается на гиромотор, который раскручивается до рабочей скорости, превышающей опорную, и забирает избыток электроэнергии. Кинетическая энергия массивного рекуператора описывается выражением

$$W_K = J\frac{\Omega^2}{2},$$

а энергия электрического поля в заряженном конденсаторе имеет вид

$$W_E = C\frac{U^2}{2},$$

где J – момент инерции гиромотора;

Ω – его угловая скорость вращения;

C – емкость конденсатора;

U – напряжение на заряженном конденсаторе.

На основании электромеханической аналогии заключаем, что процесс накопления механической энергии в массивном рекуператоре моделируется процессом заряда конденсатора C, подключенного к выходному выпрямителю асинхронного генератора.

Рассмотрим движение под уклон трех транспортных средств (троллейбусов). Рабочая частота напряжения каждого асинхронного двигателя в режиме движения задается индивидуально $\omega_i(t)$, а в режиме асинхронного генератора частота определяется решением соответствующего дифференциального уравнения. В стационарном режиме, предшествующем спуску, все гиромоторы раскручены до опорной скорости, соответствующей крейсерской скорости движения 50 км/час. Это соответствует заряду моделирующих конденсаторов C_i, $i = 0, 1..., 3$ примерно до напряжения питания E.

При выходе двигателя в режим рекуперации в связи с увеличением его скорости под действием дополнительного момента или под действием снижения частоты напряжения $\omega_i(t)$, напряжение на двигателе начинает превышать напряжение сети, и происходит процесс рекуперативного повышения напряжения вдоль линии. Гиромоторы рекуператоров раскручиваются до рабочей скорости, большей опорной, что соответствует дополнительному заряду конденсаторов C_i, $i = 0, 1..., 3$. При достаточно большой емкости этих конденсаторов вся энергия рекуперации накапливается в конденсаторах, и значительного повышения напряжения на линии не происходит.

При движении троллейбусов вновь по горизонтальному участку конденсаторы постепенно разряжаются до рабочего уровня, т.е. накопленная энергия рекуперации постепенно затрачивается на изменение скорости движения при разгоне или движении в гору.

Таким образом, моделирование движения группы троллейбусов по линии с уклоном выполняется численным решением трех дифференциальных уравнений для скоростей вращения Ω_i двигателей и дифференциальных уравнений для напряжений на конденсаторах.

При этом для упрощения полагаем, что на каждом асинхронном двигателе задается частота ω_i, а напряжения на двигателях определяются решением системы соответствующих алгебраических уравнений на каждом шаге моделирования.

Рассмотрим вначале движение троллейбусов, не оснащенных гиромоторными рекуператорами. На рис.6 изображены графики потенциалов точек контактов троллейбусов с линией, определяемые напряжениями двигателей. После того, как первый троллейбус въезжает на спуск, начинается повышение потенциалов всех точек линии. После въезда на спуск второго троллейбуса напряжение на линии сравнивается с напряжением питающей подстанции в момент $t = 2$ с. После въезда на спуск третьего троллей-

буса напряжение на линии значительно превышает напряжение на подстанции.

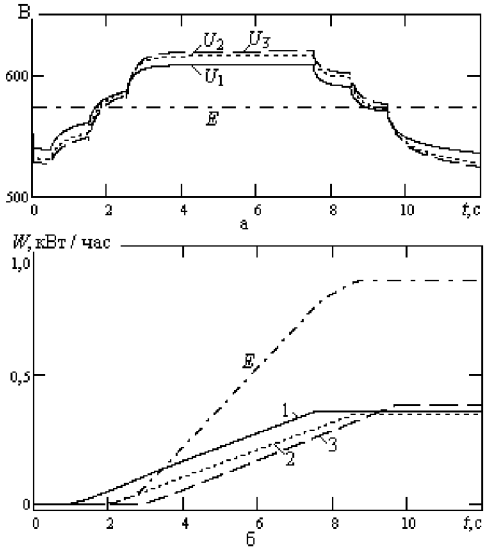


Рис.6. Движение группы троллейбусов на спуске:
а) напряжения на двигателях;
б) энергия рекуперации.

Далее рассмотрим движение троллейбусов, оснащенных гиромоторными накопителями энергии, а также большим гиромоторным накопителем вблизи подстанции. Оценим необходимые параметры рекуператоров с учетом объема накапливаемой электроэнергии. Как следует из рис.6 в среднем на спуске под уклоном 10^0 и длительностью 6 с один тяговый асинхронный двигатель вырабатывает 0,37 кВт·час, что составляет 1,35 МДж. Установим базовую скорость вращения маховиков $\Omega_Б = 250$ с$^{-1}$, а рабочую скорость $\Omega_Р = 600$ с$^{-1}$. Тогда получаем уравнение для определения момента инерции маховика $0{,}5J\left(\Omega_Р^2 - \Omega_Б^2\right) = 1{,}35 \cdot 10^6$. Отсюда получаем момент инерции $J = 9{,}2$ кг·м^2. Так как маховик гиромоторного рекуператора представляет диск, то его момент инерции вычисляется по формуле $J = 0{,}5mR^2$, откуда получаем оценку массы и радиуса маховика рекуператора $mR^2 = 18{,}4$ кг·м^2. При радиусе маховика 0,5 м его необходимая масса $m = 73{,}6$ кг.

В соответствии с электромеханической аналогией величины емкостей, моделирующих рекуператоры, выбираем (с запасом) по 12 Ф, а емкость большого рекуператора C_0 – 17 Ф. Начальные напряжения на емкостях в соответствии с базовой скорости вращения $U_{C1}(0) = \ldots = U_{C3}(0) = 250$ В; $U_{C0}(0) = 350$ В.

Результаты расчетов моделирования режимов трех рассмотренных выше троллейбусов, идущих вниз по спуску, оснащенных гиромоторными рекуператорами, показывают, что за время спуска конденсаторы заряжаются до 458 В, а конденсатор C_0 – до 500 В. Скольжения двигателей принимают отрицательные значения, и их величины составляют

$$S_1 = -0{,}058;\ S_2 = -0{,}0415;\ S_3 = -0{,}0384.$$

На рис.7,а изображены графики изменения напряжений на двигателях (потенциалы узлов 1, 2, 3).

Рис.7,а показывает, что значительного превышения напряжения в линии в этом случае не происходит по сравнению с ситуацией, изображенной ранее на рис.6,а. Превышение на 20 В наступает только в течение 2 с, напряжение в узле φ_0 превышает напряжение питания всего на 2 В и составляет 577 В.

На рис.7,б представлены графики энергии, вырабатываемой двигателями, а на рис.7,в изображены графики энергии, накапливаемой в гиромоторных рекуператорах троллейбусов и в стационарном гиромоторе.

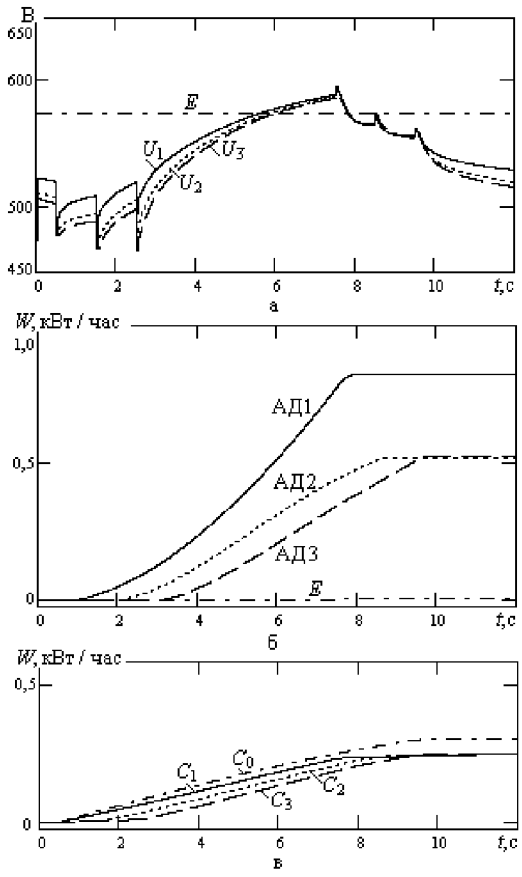


Рис.7. Движение группы троллейбусов, оснащенных рекуператорами:

а) напряжения на двигателях; б) в) энергия рекуперации.

Графики показывают, что второй и третий двигатели выработали к концу спуска по 0,523 кВт·час электроэнергии, а первый двигатель – 0,822 кВт·час.

Эти величины больше, чем при спуске без рекуператоров. Общая энергия, выработанная тремя двигателями, передается заряжающимся конденсаторам: три конденсатора, имитирующие накопители на троллейбусах, накапливают по 0,25 кВт·час, а емкость C_0 накапливает 0,306 кВт·час.

В линию возвращается 0,02 кВт·час. Энергия также расходуется на нагрев резисторов в системе.

Проведенное численное моделирование показало, что массивные рекуператоры, устанавливаемые на троллейбусах, и стационарный, практически снимают остроту проблемы значительного повышения напряжения на линии при одновременном движении нескольких троллейбусов на длинном спуске.

Рассчитанных емкостей достаточно и для накопления энергии на более длинном и крутом спуске, так как конденсаторы зарядились не до расчетного рабочего напряжения.

Кроме того, избыток энергии по-прежнему будет передаваться в сеть на источник E_C, снабженный полупроводниковым инвертором для возврата энергии в питающие силовые сети.

Заключение

Проблема рекуперации энергии в городском электротранспорте в условиях пересеченной местности является актуальной, так как при движении под уклон напряжение на контактной сети повышается на 25-30 %, и возвращаемая энергия бесполезно гасится в блоках сопротивлений. Для ее накопления и использования целесообразно на движущемся электротранспорте применять гиромоторные рекуператоры. Они раскручиваются за счет избыточной энергии и накапливают кинетическую энергию, которая далее используется при разгоне или движении на подъем. Диаметр роторов гиромоторов может достигать одного метра, вес до сотни килограммов. При этом за время спуска по дороге под уклон ротор гиромотора может накапливать до 0,25 кВт·час электроэнергии.

Список литературы

1. Онищенко Г.Б. Электрический привод. М.: изд. центр «Академия», 2008. – 288 с.
2. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. М.: Энергоатомиздат. 1981. 576 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: изд-во «Энергия», 1974. 840 с.
4. Архангельский В.И. Системы реверсивных электроприводов. Киев, изд-во «Техніка», 1972. 328 с.
5. Автоматизированный электропривод в промышленности / Под ред. Чиликина М.Г., Петрова И.И. М.:изд-во «Энергия», 1974. 376 с.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: изд-во «Юрайт», 2012. 701 с.

References

1. Onischenko G.B. *Elektrischeskij privod* [Electric drive]. Moscow, Izd. tcentr “Akademiua”, 2008, 288 p.
2. Tchilikin M.G., Sandler A.S. *Obcshji kurs elektroprivoda* [General course of electric drive]. Moscow, Izd. “Energoatonizdat”, 1981, 576 p.
3. Vol’dek A.I. *Elektricsheskie maschiny* [Electric machinrs]. Leningrad, Izd. “Energiua”, 1974, 840 p.
4. Arhangel’skij V.I. *Sistemy reversivnyh elektroprivodov* [Sistems of revers electric drive]. Kiev, Izd. “Tehnika”, 1972, 328 p.
5. *Avtomatizirovannyi elektroprivod v promyshlennocti* [The automated electromechanic is in industry] / By edit. Chilikin M.G., Petrov I.I. Moscow, Izd. “Energiua”, 1974, 376 p.
6. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* [Theoretical bases of the electrical engineering. Electrical circuits]. Moscow, Izd. “Juraijt”, 2012, 701 p.

УДК 620.91: 620.92: 621.383.51

Увеличение эффективности работы солнечных элементов модификацией их поверхности наночастицами серебра

В.В. Кувшинов[1], Н.В. Морозова[2], В.В. Смирнов[3], Д.В. Чунин[4], В.В. Решетняк[5]
ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]VVKuvshinov@sevsu.ru, [2]Innat@mail.ru, [3]VVSmirnov@sevsu.ru, [4]Dmitriychunin@gmail.com , [5]Reshetnyk@mail.ru

Статья поступила 15.04.2018 г.; после доработки 20.04.2018 г.

Аннотация
В настоящей работе для увеличения эффективности работы фотоэлектрических преобразователей авторами предложено использовать модифицирование их приёмной поверхности нанесением покрытия из наночастиц серебра, полученных импульсно-искровым методом диспергирования.

Ключевые слова: фотопреобразователь, фотоэлектрический модуль, сетевые электростанции, наночастицы, солнечный элемент, фоклин, нанокластеры серебра, мощностные характеристики.

Increase the efficiency of solar cells by modifying their surface with silver nanoparticles

V.V. Kuvshjnov[1], N.V. Morozova[2], V.V. Smirnov[3], D.V. Chunin[4], V.V. Reshetnyk[5]
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]VVKuvshinov@sevsu.ru, [2]Innat@mail.ru, [3]VVSmirnov@sevsu.ru, [4]Dmitriychunin@gmail.com , [5]Reshetnyk@mail.ru

Received 15.04.2018 y.; received in final form 20.04.2018 y.

Abstract
In this paper, to increase the efficiency of photovoltaic inverters the authors use the modification of their reception surface by coating with silver nanoparticles obtained by pulsed-spark method of dispersion.

Keywords: photo converter, photoelectric module, network power stations, nanoparticles, solar cell, focline, silver nanoclusters, power characteristics.

Введение

Главной проблемой при использовании фотоэлектрических установок является невысокая плотность и непостоянство потока солнечной радиации, преобразовываемой в электрическую энергию, низкий к.п.д. и эффективность использования фотопреобразователей, и, как следствие, высокая себестоимость на единицу мощности. Коэффициент преобразования солнечной радиации в электрическую энергию промышленными кремниевыми фотоэлектрическими преобразователями составляет не более 20 % [1].

Невысокий радиационный потенциал солнечной энергии определяет более высокие требования к эффективности использования солнечных установок для электроснабжения индивидуальных потребителей, к методам определения их основных параметров, к способам увеличения их мощностных характеристик.

Повысить мощность фотоэлектрических преобразователей, не увеличивая их площади, можно при использовании концентраторов потока солнечного излучения. Однако для этого необходимо увеличивать апертуру приемной поверхности фотоэлектрической установки.

Стратегической целью исследований являлось изучение изменения вольтамперных и увеличения мощностных характеристик фотоэлектрических солнечных установок в зависимости от использования концентраторов специальных конструкций, представляющих собой различные функциональные покрытия приёмной поверхности фотоэлектрических элементов [2]. В данной работе в качестве основного объекта исследования был выбран серийный заводской фотоэлектрический поликремневый элемент. Из аналогичных элементов состоят модули российского производства PS-250 [3], используемые на крымских сетевых электрических станциях (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид фотоэлектрического модуля PS-250

Эксперименты проводились на кафедрах «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» Севастопольского государственного университета (Института Ядерной энергии и промышленности) и «Технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов» Московского авиационного института (Национальный исследовательский университет). Задачей исследования авторов являлось экспериментальным путём улучшить показатели фотоэлектрических преобразователей, в частности повысить их мощностные характеристики, не увеличивая при этом площадь их приёмной поверхности.

Постановка задачи исследования

Для увеличения плотности светового потока на фотоэлектрические преобразователи ранее авторы использовали низкопотенциальный плоский концентратор собственной разработки [2], устанавливаемый на панелях солнечной батарей фотоэлектрической установки.

Подобные концентраторы, применяемые в различных областях солнечной энергетики, равномерно распределяют лучи по приёмной поверхности и могут быть использованы для повышения мощностных характеристик серийных фотоэлектрических модулей [4].

В данной работе был использован другой принцип концентрации падающих на рабочую поверхность фотоэлемента квантов солнечной радиации. Для повышения ресурса работы, стабилизации фотоэлектрических характеристик и увеличения электрической выработки фотопреобразователя, поверхность солнечных элементов модифицировали нанокластерами серебра размерностью 5 - 20 нм. Такой тип напыления увеличивает защитные показатели фотоэлементов (в частности, при работе на морском побережье) и за счёт специального нанопокрытия увеличивает количество фотонов, которые участвуют в фотоэлектрическом эффекте при постоянном потоке падающей солнечной радиации.

Наночастицы серебра были получены импульсно-искровым методом диспергирования металлов [6-8]. Принцип действия установки поясняется на рис. 2, где показана схема питания реактора.

Питание установки для генерации разрядов в жидкой среде обеспечивается высоковольтным трансформатором, обеспечивающим требуемый для работы реактора диапазон напряжений 4 ÷ 10 кВ. Высокое напряжение с трансформатора заряжает разрядный конденсатор С до установленного на высоковольтном коммутаторе Р амплитудного значения напряжения. При достижении заданного на высоковольтном коммутаторе Р пробивного напряжения, через электродную систему, помещенную в рабочую жидкость, возникает искровой разряд, вызывая их эрозию.

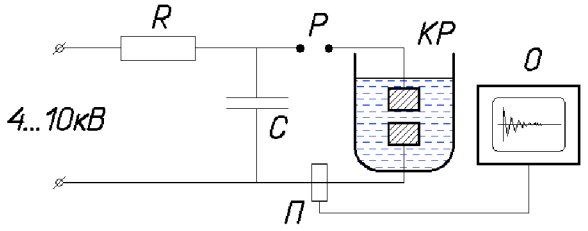


Рис. 2. Схема питания реактора:
С – высоковольтный конденсатор 15 кВ;
Р – разрядник воздушный (высоковольтный коммутатор); П – пояс Роговского; О – осциллограф; КР – камера разрядная.

Импульсный электрический разряд в жидкости – процесс кратковременного выделения большой энергии. Фактически это электрический взрыв в первоначально малом объёме канала искры разряда, проложенного стримером, появившимся под действием высокого электрического потенциала между противостоящими электродами.

Токи разряда в импульсах достигают значений 1 ÷ 2 кА. При этом температура в искре достигает $(20 \div 30)\cdot 10^3$ К. Высокая температура катодного пятна обеспечивает переход части электрода из твёрдой в жидкую фазу, которая частично испаряется, а частично выбрасывается ударной волной расширяющейся парогазовой смеси и испаряется в горячей зоне разряда. Паровая компонента, продолжая расширяться, охлаждается с образованием зародышей докритического, а затем критического размера, которые стабилизируясь образуют субмикронные частицы сферической формы.

Полученные наночастицы были нанесены на пластину фотоэлектрического преобразователя (рис. 3).

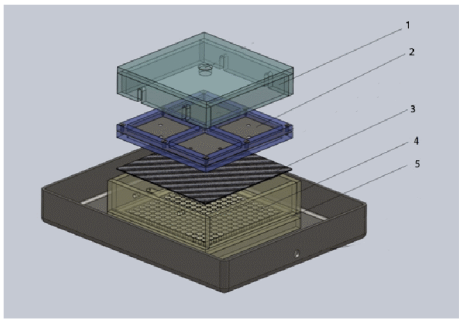


Рис. 3. Установка для нанесения наночастиц металлов:
1 - верхняя прижимная крышка; 2 - металлический электрод, закрепленный в рамку из оргстекла;
3 - кремниевая пластина: 4 основание;
5 - нижний электрод

Было подготовлено два образца, на первый наночастицы серебра были осаждены методом электрофореза, другой образец готовился путём длительного выдерживания (36 часов) пластины преобразователя в коллоидном растворе серебра.

На рис. 3 показана принципиальная схема установки для нанесения наночастиц металлов на поверхность проводящего материала методом электрофореза.

Пластина преобразователя помещается между электродами 2 и 5. Установка заполняется коллоидным раствором и подключается потенциал к электродам. Коллоидные частицы имеют заряд, поэтому они могут двигаться в электрическом поле. Достигая электрода, частицы теряют заряд и слипаются – коллоидный раствор коагулирует на поверхности материала.

На рис. 4 и 5 представлены снимки аналогичных покрытий, выращенных на подложках из кремния, полученные с помощью электронного микроскопа.

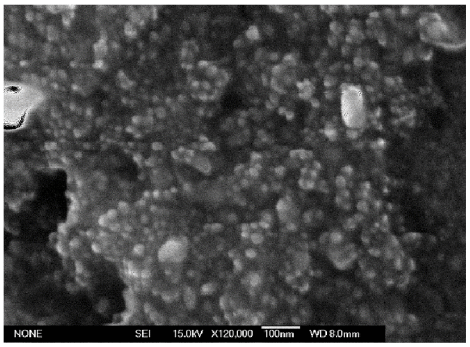


Рис. 4. Покрытие из наночастиц серебра на кремниевой подложке, полученные методом электрофореза

Как видно на снимке, наночастицы имеют размеры, принадлежащие преимущественно диапазону 5 ÷ 20 нм.

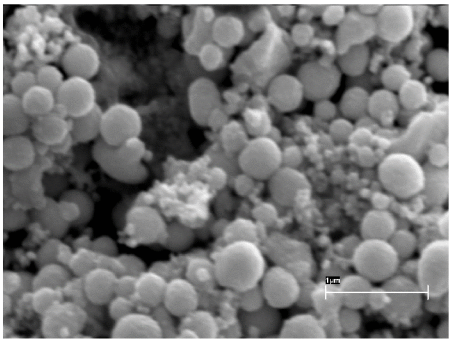


Рис. 5. Наночастицы серебра на подложке (Si) после длительного выдерживания в растворе

Как следует из рисунка 5, при длительном выдерживании в коллоидном растворе серебра на поверхности подложки исходные наночастицы успевают образовывать агломераты со средними размерами 200÷500 нм.

Результаты исследования

Для оценки функциональных характеристик были проведены сравнительные исследования заводских промышленных поликремневых фотоэлементов, используемых в фотоэлектрических модулях PS-250, без напыления и

фотоэлементов с покрытием из наночастиц серебра.

Исследования характеристик фотоэлектрических преобразователей проводили в натурных условиях на открытой площадке, при естественном постоянном солнечном освещении (около 950 Вт/м^2), полученные данные сравнивали с паспортной вольтамперной и мощностной характеристиками заводских элементов. При проведении исследований использовался метод прямых измерений характеристик фотопреобразователя по току и напряжению при переменном нагрузочном сопротивлении [5].

Типичные (паспортные) мощностные характеристики фотоэлемента представлены на рис. 6 (пунктирная линия).

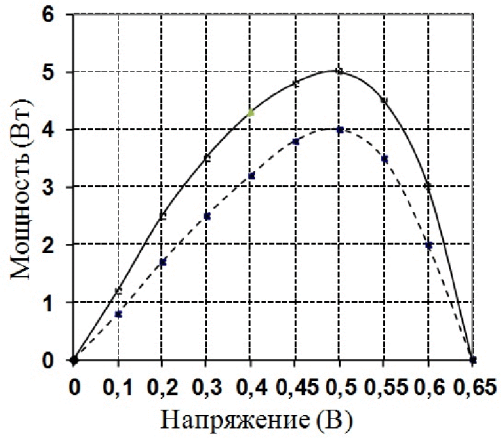


Рис. 6. Мощностные характеристики фотоэлементов: пунктирная линия – заводские фотоэлементы без нанопокрытия; сплошная линия – фотоэлементы с покрытием из наночастиц серебра (данные получены при освещенности около 950 Вт/м^2).

Экспериментальные характеристики, полученные при измерениях фотоэлементов, покрытых наночастицами серебра, показаны на рисунке 6 сплошной линией.

Как видно из графиков (рис.6), имеет место увеличение на 20 % мощностных характеристик фотоэлектрических преобразователей при нанесении на их рабочую поверхность нанопокрытий. Экспериментальные исследования показали, что при использовании нанопокрытий увеличивается не только электрические показатели, но и энергетические показатели солнечных батарей. По мощностным характеристикам фотоэлектрических модулей можно судить о выработке электрической энергии в данное время года, суток, при данных климатических факторах [9]. Эти результаты необходимы при расчётах систем солнечного электрообеспечения, при проектировании фотоэлектрических станций [10].

Выводы

1. Полученные данные способствуют углублению знаний в области фотовольтаики и являются продолжением исследований в области повышения мощностных характеристик различных типов солнечных элементов, экспериментальных методов увеличения их коэффициента преобразования, а также увеличения эффективности использования энергетических установок на сетевых и автономных солнечных станциях.
2. Использование фотоэлементов с нанопокрытиями позволяет увеличить выработку электроэнергии фотоэлектрическими установками за счёт более полного преобразования потока падающей солнечной радиации даже при малых углах падения солнечных лучей на приёмную поверхность.
3. Модифицирование поверхности фотоэлементов наночастицами серебра приводит к повышению мощностных характеристик фотоэлементов на 20 %.

Список литературы

1. Арбузов Ю.Д. Основы фотоэлектричества / Ю.Д. Арбузов, В.М. Евдокимов – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 292 с.
2. Кувшинов В.В. Пат. № 150120 Российская федерация; МПК H01L31/00. Солнечный концентратор для фотоэлектрических модулей / Башта А.И., Кувшинов В.В., Сафонов В. А.; заявитель и патентообладатель Кувшинов В.В. – Заявка № 2014149411; заявл. 17.10.2014; опубл. 27.01.2015, Бюл. № 3.
3. Кувшинов В.В. Исследование сезонной работы промышленного фотоэлектрического модуля PS 250 / Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Косий А.Г. // Энергетические установки и технологии. 2017. Т. 3. № 3. С. 73-78.
4. Кувшинов В.В. Исследование характеристик фотоэлектрических модулей, используемых в сетевых солнечных станциях / В.В. Кувшинов // Сборник научных трудов СНУЯЭ и П – 2013 – Вып. 4 (48) – С.170-177.
5. Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния. Методика коррекции результатов измерения вольтамперной характеристики (МЭК 891-87): ГОСТ 28976-91. – [Введ. 19.04.91]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 42 с. – (Национальный стандарт России).
6. Остроухов Н.Н., Тянгинский А.Ю., Слепцов В.В., Церулев М.В. Электроразрядная технология

получения, диагностики и биологическое применение гидрозолей металлов с частицами нанометрового размера. ФХОМ, 2013, №1, с.77-82.
7. P. Mandal, S. Sharma / Progress in plasmonic solar cell efficiency improvement: A status review / Renewable and Sustainable Energy Reviews, 65 (2016), 537–552 (DOI: 10.1016/j.rser.2016.07.031)
8. J. Ortiz-Gonzalez, R. Santbergen, H. Tan, A. Schmidt Ott, M. Zeman, A.H.M. Smets / Plasmonic nanoparticle films for solar cell applications fabricated by size-selective aerosol deposition. / Energy Procedia, 60 (2014), 3 – 12.
9. 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.
10. Кувшинов В.В. Использование солнечных концентраторов для повышения мощностных характеристик сетевых фотоэлектрических станций / В.В. Кувшинов // Сб. науч. работ СНУЯЭиП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2014. – Вып. 1 (49). – С. 144-149.

References

1. Arbuzov Yu.D. Photoelectricity bases / Yu.D. Arbuzov, V.M. Evdokimov –Moscow, VIESH, 2007. – 292 pages.
2. Kuvshinov V.V. Russian Federation Patent 150120 (H01L31/00). The solar concentrator for photoelectric modules / Kuvshinov V. V., Bashta A.I., Safonov V. A.; the patent holder Kuvshinov V.V. – Application No. 2014149411 Publ. 1/27/2015, Bulletin No. 3.
3. Kuvshinov V.V. Investigation of the seasonal operation of the industrial photovoltaic module RS-250 / Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Kosiy A.G. // Power plants and technologies. 2017. T. 3. № 3. P. 73-78.
4. Kuvshinov V.V. A research of characteristics of the photoelectric modules used in network solar stations / V.V. Kuvshinov// Collection of scientific works SNUNE&I. 2013, Issue 4 (48) – P. 170-177.
5. Kuznetsov K.V. A research of characteristics of a solar air hybrid collector / K.V. Kuznetsov, I.I. Tyukhov, E.D. Sergiyevsky // Power supply and energy saving in agriculture. Proc. of the 6th International scientific and technical conference, May 13-14, 2008 – Moscow, VIESH, 2008. – Part 4. – Pages 227-231.
6. Ostroukhov N.N., Tyanginsky A.Yu., Sleptsov V.V., Tserulev M.V. Electrodischarge technology of obtaining, diagnostics and biological application of hydrosols of metals with the nanometer size particles. Physics and Chemistry of Materials Treatment, 2013, No. 1, p. 77-82.
7. 16. P. Mandal, S. Sharma / Progress in plasmonic solar cell efficiency improvement: A status review / Renewable and Sustainable Energy Reviews, 65 (2016), 537–552 (DOI: 10.1016/j.rser.2016.07.031)
8. 17. J. Ortiz-Gonzalez, R. Santbergen, H. Tan, A. Schmidt Ott, M. Zeman, A.H.M. Smets / Plasmonic nanoparticle films for solar cell applications fabricated by size-selective aerosol deposition. / Energy Procedia, 60 (2014), 3 – 12.
9. Kuvshinov V.V. Change in power characteristics of photo-electric installations at various climatic factors / Kuvshinov V.V. // Power plants and technologies. 2017. T. 3. No. 2. P. 61-66.
10. Kuvshinov V.V. Use of solar concentrators for increase in power characteristics of network photoelectric stations // Collection of scientific works SNUNE&I. – Sevastopol, 2014. – Issue 1 (49). – P. 144-149.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

УДК 550.837.3

Условия подготовки исходной воды для обработки на баромембранных установках

А.М. Акимов[1], С.А. Котельникова[2]

[1,2]*ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.* [2]*cvetlana.832inbox.ru*

Статья поступила 25.04.2018 г.; после доработки 29.04.2018 г.

Аннотация

Несмотря на многолетний опыт эксплуатации значительного количества баромембранных установок, вопрос о нормировании отдельных компонентов, содержащихся в обрабатываемой воде, окончательно не решен. По некоторым видам загрязнений имеются лишь отдельные экспериментальные данные. Задачи организации и учреждений, занимающихся созданием и эксплуатацией баромембранных установок разработать методики оценки загрязнений в исходной воде.

Ключевые слова: виды загрязнений воды, индекс загрязненности, обратный осмос, преимущества и недостатки баромембранных методов.

Conditions of preparation of raw water for treatment for baromembrane in installations

A.M. Akimov[1], S.A. Kotelnikova[2]

[1,2]*FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.* [2]*cvetlana.832inbox.ru*

Received 25.04.2018 y.; received in final form 29.04.2018 y.

Abstract

Despite many years of experience in the operation of a significant number of baromembrane plants, the issue of rationing of individual components contained in the treated water has not been finally solved. For some types of contamination there are only separate experimental data. The tasks of the organization and institutions involved in the creation and operation of baromembrane plants are to develop methods for assessing contamination in the source water.

*Keywords :*types of water pollution, pollution index, reverse osmosis, advantages and disadvantages of baromembrane methods.

Введение

Влияние многих ингредиентов еще не изучено в той мере, чтобы можно было выработать требования к их предельным концентрациям в воде, поступающей в обратноосмотические аппараты. Практика применения обратноосмотического обессоливания различных минерализованных вод показала, что широко используемые в водоподготовке показатели качества воды (мутность, прозрачность, содержание взвешенных веществ) не позволяют судить об эффективности и производительности мембран при обработке этих вод.Соленые воды с формально одинако-

вым значением названных показателей могут в разной степени влиять на уменьшение производительности и селективности обратноосмотических аппаратов. Поэтому для оценки необходимости и степени осветления воды перед подачей ее на обратноосмотическую обработку используют ряд специальных показателей.

Показатели качества воды

Самый простой показатель качества воды, так называемое время загрязнения мембран (Membrane Fouling Time), определяется как продолжительность фильтрования 1л исследуемой воды под давлением 70 кПа через мембранный фильтр фирмы «Миллипор» с размером пор 0,45 мкм. Полученная продолжительность фильтрования приводится к стандартной температуре 25 °С с учетом вязкости воды при температуре определения.

Фирма «Курита» (Япония) оценивает качество воды по интенсивности цвета осадка, образовавшегося на мембранном фильтре «Миллипор» с размером пор 0,45 мкм при фильтровании под давлением 210 кПа 1 л исследуемой воды.

Полученная интенсивность цвета осадка сравнивается с предлагаемой фирмой стандартной шкалой. Этот метод имеет, очевидно, существенный недостаток – не учитываются изменения цвета при изменении химического состава загрязнения.

Однако он может оказаться очень полезным при эксплуатации конкретной станции обессоливания, когда установлено содержание взвешенных и коллоидных веществ, которым следует ограничиться при подготовке воды перед обратноосмотической ее обработкой и по указанной методике определена интенсивность окрашивания осадка, соответствующая данной концентрации загрязняющих компонентов.

Фирма «Пермутит» (США) оценивает качество осветления воды перед обратным осмосом критерием, называемым «фактором закупоривания» (Plugging Factor, PF).

Для аппаратов с полыми волокнами фирма рекомендует PF = 50 – 60 %; трубчатые конструкции допускается эксплуатировать при PF = = 45 – 50 %.

Фирма «Дюпон» предложила использовать «индекс плотности осадка» (Silt Density Index – SDI. Silt Density Index (SDI-индекс) – это индекс плотности взвешенных частиц в единице объема воды - определяет снижение производительности мембран за счет образования на их поверхности загрязнений, состоящих из взвешенных и коллоидных микрочастиц и служит как характеристика степени загрязнения воды механическими и коллоидными примесями и ее пригодности для подачи в мембранные установки.

В настоящее время согласно требованиям ASTM D-4189 *SDI – индекс* является обязательным первичным тестом качества исходной воды (таблица 1), в самом общем виде показывающим вероятность образования осадков коллоидных и взвешенных веществ, способных загрязнить поверхность мембранных элементов.

Таблица 1. *Значения SDI–индекса для типичных природных источников воды.*

Тип исходной воды	Максимум SDI	Минимум SDI
Артезианская	5	2
Поверхностная	175*)	5

**) – для некоторых открытых водоемов величина SDI–индекса может достигать значения 500.*

По значениям SDI_{15} можно судить о сложности требуемой предварительной подготовки воды для мембранных процессов: SDI < 5 – предварительная подготовка не требуется; SDI = 5 – 10 - требуется одноступенчатая предварительная подготовка; SDI > 10 – требуется двухступенчатая предварительная подготовка.

Выбор метода подготовки исходной воды

Для снижения величины SDI применяется предварительная подготовка исходной воды. Как правило, для удаления взвешенных веществ и коллоидов используют такие хорошо известные методы, как фильтрование и коагуляция.

Правильный выбор метода подготовки растворов является первым шагом к снижению забивания мембран.

Часто масса времени и усилий тратятся на очистку мембран, тогда как о стадии предварительной обработки исходного раствора просто забывают.

Необходимо обратить внимание на показатели содержания отдельных ингредиентов в исходной воде, значения которых определяют

эксплуатационные характеристики установок и надежность их работы.

Величины содержания указанных веществ указаны в таблице 2. Для сравнения в этой же таблице приведены значения этих же веществ согласно требованиям СанПиН 2.1.4.1074.

Таблица 2. *Сравнительные показатели качества воды.*

Наименование ингредиента	**Единицы измерения**	**Требования в соответствии с СанПиН**	**Требования к исходной воде для обратно осмотических установок**
Взвешенные вещества (мутность), не более	мг/л	1,5	0,6
Жесткость общая, не более	мг-экв/л	7,0	20
Общее солесодержание, не более	мг/л	1000	50 000
Цветность, не более	градус	20	3
Значение pH исходной воды, не более		6 – 9	3 – 10
Коллоидный индекс (SDI), не более	мг/л	–	0,4
Железо общее, не более	мг/л	0,3	0,1
Нефтепродукты	мг/л	0,1	отсутствие
Сероводород и сульфиды	мг/л	0,003	отсутствие
Твердые абразивные частицы	мг/л	–	отсутствие
Свободный активный хлор не более	мг/л	0,3	0,1
Окисляемость перманганатная, не более	мгO_2/л	5,0	2,0

Различия в требованиях, предъявляемых для исходной воды согласно СанПиН и для ОО-установок, касаются не только органолептических показателей качества воды, т.е. взвешенных веществ и цветности воды, но и нефтепродуктов, ПАВ, окисляемости, коллоидов (железа, кремниевой кислоты).

Поэтому большое внимание следует уделить процессам предварительной подготовки исходной воды перед тем, как подать воду на обратноосмотическую установку.Особое внимание следует сосредоточить на содержании активного хлора.

Дело в том, что активный хлор весьма отрицательно воздействует на обратноосмотические мембраны и вызывает их деструкцию (разрушение).

Поэтому, если в процессе предварительной очистки воды используются хлорсодержащие агенты, следует обязательно вводить стадию адсорбционной очистки воды на активном угле.

Этот же процесс поможет снизить такой показатель, как окисляемость воды, отвечающий за общее содержание органических соединений в исходной воде.

В зависимости от степени загрязненности исходной воды методы ее обработки включать: тепловую обработку, регулирование pH, пропорциональное дозирование комплексообразующих агентов, биоцидов, коагулянтов с помощью насосов-дозаторов, аэрацию, обезжелезивание, адсорбцию на активированном угле, механическая очистка и осветление воды, умягчение (Na-катионирование), предварительные микрофильтрацию или ультрафильтрацию, обеззараживание воды с помощью установок ультрафиолетовая стерилизации.

Дозирование химических реагентов в процессе предварительной подготовки воды становится неотъемлемым процессом для обратно осмотических систем.

Особых проблем при эксплуатации установок обратного осмоса при правильно подготовленной воде нет.

Степень насыщения пермеата ингредиентами, присутствующими в исходной воде, зависит от типа используемого мембранного обратноосмотического элемента, а также от материала самой мембраны.

Обычно после достаточно корректно подготовленной воды степень обессоливания воды на обратноосмотической установке составляет 95 - 98 %, то есть электрическая проводимость пермеата находится в пределах от 20 до 50 mS или в пересчете на удельное сопротивление воды 20 – 50 к Ом·см.

Перед проектированием системы обратного осмоса должен быть выполнен полный и точ-

ный анализ исходной воды. Помимо общих показателей, протокол анализа воды должен содержать наименование и концентрацию – следующих компонентов в воде (таблица 3):

Таблица 3. *Наименование и концентрация компонентов в воде.*

Катионы:	мг/л	мг-экв./л	%	Анионы	мг/л	мг-экв./л	%
Кальций Ca^{2+}				Бикарбонаты HCO_3^{2-}			
Магний Mg^{2+}				Карбонаты CO_3^{2-}			
Натрий Na^{+}				Сульфаты SO_4^{2-}			
Калий K^{+}				Хлориды Cl^{-}			
Железо Fe^{2+}				Фториды F^{-}			
Железо Fe^{3+}				Нитраты NO_3^{-}			
Марганец Mn^{2+}				Нитриты NO_2^{-}			
Алюминий Al^{3+}				фосфаты PO43–			
Аммоний NH^{4+}				Бораты (по бору) B			
Барий Ba^{2+}				Сульфиды S^{2-}			
Стронций Sr^{2+}				Кремний по SiO_2			
Медь Cu^{2+}							
Цинк Zn^{2+}							
Сумма катионов □			100%	Сумма анионов □			100%

Пределы обнаружения катионов Ba^{2+} и Sr^{2+} должны быть не более 1 мкг/л (1 ppb) и не более 1 мг/л (1 ppm), соответственно.

При этом суммарное содержание катионов в воде, выраженное в мг-экв./л, должно быть равно суммарному содержанию анионов, выраженное в мг-экв./л. Ионный баланс воды сойдется только при этом условии. Комбинируя между собой катионы и анионы, присутствующие в исходной воде, можно легко убедиться в том, что практически в любой воде возможно образование труднорастворимых соединений. Вопрос остается только один – достигнет ли их концентрация предельной, при которой начнется выпадение этих веществ в осадок.

Ответ на него «лежит на поверхности» – опыт эксплуатации установок обратного осмоса показывает, что возникают ситуации, когда труднорастворимые соли концентрируются на обратно осмотических мембранах до содержания выше их предела растворимости.

Был даже составлен ряд из труднорастворимых солей в порядке уменьшения проблем с их отложениями на поверхности мембран:

$CaCO_3 \rightarrow CaSO_4 \rightarrow$ Силикаты $\rightarrow SrCO_3 \rightarrow BaSO_4 \rightarrow SrSO_4 \rightarrow CaF_2 \rightarrow CaSiO_3 \rightarrow MgSiO_3 \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 \rightarrow Fe(OH)_2$.

Применение обратного осмоса имеет ряд преимуществ:

- очень высокое качество получаемой воды, которое обусловлено весьма «мягкими» с физико-химической точки зрения условиями проведения процесса;
- неограниченная производительность (путем набора стандартных модулей и блоков) и – одновременно – небольшие габариты;
- отношение: производительность/габариты – лучшее по сравнению с другими методами обессоливания – дистилляцией, ионообменом, электродиализом;
- относительно низкие эксплуатационные расходы;
- малый расход ингибиторов отложений и реагентов для отмывки отложений на мембранах;
- низкая энергоемкость (процесс осуществляется без фазовых переходов, и, следовательно, энергия требуется лишь для создания градиента давления и рециркуляции раствора);
- возможность почти во всех случаях сброса концентрата в канализацию (в окружающую среду) без обработки.

К недостаткам баромембранных методов можно отнести следующее:

- необходима тщательная предподготовка воды для обеспечения большой производительности мембран и длительного срока их службы;
- большой объем сбрасываемого концентрата (с учетом компоновочных решений расход пермеата может составить 75–80% исходной воды, концентрат – 20–25%) и, следовательно, значительный расход исходной воды;
- большие капитальные затраты;
- желательный непрерывный режим работы

установок.

Определяющими при реализации мембранных методов являются разработка и изготовление полупроницаемых мембран, отвечающих следующим основным требованиям:

- высокая разделяющая способность (селективность);
- высокая удельная производительность (проницаемость);
- химическая стойкость к действию компонентов разделяемой системы;
- неизменность характеристик в процессе эксплуатации;
- достаточная механическая прочность, отвечающая условиям монтажа, транспортирования и хранения мембран;
- низкая стоимость.

В настоящее время на рынке есть мембраны двух основных типов, изготовляемые из ацетилцеллюлозы (смесь моно-, ди- и триацетата) и ароматических полиамидов.

Для ацетилцеллюлозных мембран характерна высокая удельная производитель-ность. По форме мембраны подразделяются на трубчатые, листовые (спирально свернутые) и выполненные в виде полых волокон.

Полиамидные мембраны имеют более низкую удельную производительность. Их выпускают в виде рулонных элементов, что позволяет обеспечить максимальную площадь поверхности на единицу объема, которая примерно в 15 раз больше, чем у элементов в плоских конструкциях.

Важно отметить: полиамидные мембраны очень устойчивы к воздействию химических и биологических факторов, что обеспечивает большую долговечность их по сравнению с ацетилцеллюлозными мембранами, гидролиз которых неизбежен, хотя и может быть сведен к минимуму, если строго контролировать значение pH и температуру.

Есть также мембраны, предназначенные специально для обработки морской воды. Изготовленные из тех же полимеров, они имеют более плотную структуру, позволяющую им обессоливать в одну стадию растворы, подобные морской воде и содержащие несколько десятков граммов солей в 1 л.

Заключение

Перед проектированием системы обратного осмоса должен быть выполнен полный и точный анализ исходной воды.

Помимо общих показателей, таких как: водородный показатель pH, мутность, цветность, содержание взвешенных веществ, окисляемость перманганатная, щелочность, общая жесткость, карбонатная жесткость, солесодержание (минерализация), обсемененность микроорганизмами, содержание активного и связанного хлора и пр., протокол анализа воды должен содержать наименование и концентрацию – следующих компонентов в воде:

Список литературы

1. Акимов А.М. Оборудование и материалы ядерных энергетических установок / А.М. Акимов, С.А Федорова, С.А. Котельникова // СевГУ, Севастополь 2017г. – 138с.
2. Копылов А.С. Водоподготовка в энергетике / Копылов А.С., Лавыгин Р.М., Очков В.Ф. // - Издательский дом МЭИ, 2006 – 309.
3. Справочник для профессионалов «Водоподготовка» под редакцией д.т.н. Беликова С.Е. // Аква-терм. – 2007г.
4. Connor R. United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world. – UNESCO Publishing. 2015. – T.1.125 p.

References

1. Akimov A. M. Equipment and materials for nuclear power plants / A. M. Akimov, S. A. Fedorova, S. A. Kotelnikova // Sevgi, Sevastopol 2017. – 138 p.
2. Kopylov A. S.-water Treatment energy / Kopylov A. S., Lavygin R. M., Ochkov V. F. // - MPEI Publishing house, 2006 – 309 p.
3. A reference book for professionals "Water" under the editorship of Professor E. S. Belikov // Aquatherm. - 2007.
4. Connor R. United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world. – UNESCO Publishing. 2015. – T.1.125 p.

УДК 6340.813.11

Природа функциональных групп после механической обработки растительных отходов и их взаимодействие с вредными компонентами в водной среде

В.А. Ерофеев[1], Н.И. Черкашина[2], Э.А. Культенко[3]
[1,2,3]*ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.* [1]vaerofeev@mail.ru, [2]*Selyanskij-AS@yandex.ru*

Статья поступила 25.04.2018 г.; после доработки 30.04.2018 г.

Аннотация

Рассмотрены основные процессы протекающие при механохимической обработке пентозин- и лигнинсодержащих отходов сельскохозяйственных культур, образование функциональных групп на биополимерных структурах и природу взаимодействия модифицированных структур с радионуклидами и вредными примесями в водной среде.

Ключевые слова: экологическая безопасность, компоненты растительных отходов, лигнин, подсолнечная, овсяная, рисовая лузга, хлопковая шелуха, сорбционная емкость, жидкие среды.

The nature of the functional groups after mechanochemical processing of plant waster and their interaction with the aquatic environment

V.A. Erofeev[1] , N.I. Cherkashina[2], E. A. Kultenko[3]
[1,2,3]*Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st,, Sevastopol, 299053, Russia*
[1]vaerofeev@mail.ru, [2]*Selyanskij-AS@yandex.ru*

Received 25.04.2018 y.; received in final form 30.04.2018 y.

Abstract

The main processes occurring during mechanochemical treatment of pentosin - and lignin-containing agricultural waste, the formation of functional groups on biopolymer structures and the nature of interaction of modified structures with radionuclides and harmful impurities in the aquatic environment are considered.

Keywords: ecological safety, components of plant waste, lignin, sunflower, oat, rice husk, cotton husk, sorption capacity, liquid media.

Введение

Внедрение прогрессивных технологии для реализации экологически обоснованных программ обращения с радиоактивными и другими промышленными отходами, позволят обеспечить нормальную эксплуатацию промышленных предприятий в экологически безопасном режиме. Кроме того решение экологических проблем безопасного обращения с радиоактивными отходами является основой безопасной эксплуатации энергоблоков и дальнейшего развития атомной энергетики. В условиях АЭС основной целью переработки радиоактивных отходов (РАО) являются: максимальная минимизация объемов; перевод в стабильную физико-химическую форму, максимальное исключение выхода радионуклидов за пределы матричного ма-

териала и инженерных барьеров.

Одним из основных направлений федеральных целевых программ по обращению с РАО, отработанным ядерным топливом, утилизации и захоронении отходов является внедрение малоэнергоемких и безреагентных технологий.

Такими технологиями могут быть ионообменные и сорбционные технологии с использованием природных органических и неорганических материалов [1].

Другой проблемой оказывающей влияние на экологическую безопасность окружающей среды представляют сточные воды химических и промышленных производств, которые относятся к числу основных загрязнителей ***евтрофных*** водоемов.

Эта проблема обусловлена сложностью и высокой стоимостью очистки, а так же низкой эффективностью используемых технологий.

Кроме того, сточные воды, как правило, представляют собой сложные многокомпонентные системы, характеризующееся значительной вариабельностью своего состава по самым различным ингредиентам, что так же влияет на использование универсальных технологий очистки.

Так, например, отходы гальванических, травильных и других химических производств представляют собой отработанные электролиты и другие растворы с токсичными или вредными для окружающей среды компонентами.

В состав таких сред, как правило, входят соединения тяжелых металлов Cu, Zn, Ni, Cr, Cd, Pb, Sn, Ti, Sb, Mn и др, которые концентрируются гидробионтами и по трофической цепочки поступают, с превышением ПДК, непосредственно в организм человека.

В свете жестких требований по экологической безопасности функционирования «экологически вредных» производств, существующие системы очистки требуют модернизации и внедрения эффективных технологии, гарантирующих качественную и количественную очистку промышленных стоков от токсичных ингредиентов и радионуклидов до уровня ПДК и ПДУА.

Существенный вклад в решение этой проблемы может внести использование достаточно дешевых и универсальных технологий новых фильтрующих материалов, как альтернатива используемым в настоящее время промышленными сорбентами (цеолиты, активированные угли, вермикулит, ионообменные смолы и т.п.).

Большой интерес представляют сорбенты из полисахаридного и лигнинсодержащие сырья (плодовые косточки, верхний перекарп грецкого ореха, скорлупа кедрового ореха, арахиса и т.п.[2, 3, 4]).

Использование сорбентов на основе лигнина в целях очистки технологических сред имеет ряд преимуществ перед известными промышленными ионитами: лигнинсодержащее сырье, на основе которого получают сорбенты, являются дешевыми крупнотоннажными, ежегодно возобновляемыми отходами гидролизных производств; приемлемые и достаточно высокие физико-химические свойства (ионообменная и сорбционная емкость; универсальность по отношению очистки от вредных примесей); низкая стоимость и не сложные технологии утилизации отработанных сорбентов.

Недостатком указанных материалов является ограниченность сырьевых источников и сезонность их образования и накопления.

В этой связи, поставленная задача, обеспечения необходимых объемов промышленных поставок фильтрующих фильтрующих, может быть реализована при использовании пентозан- и лгнинсодержащих отходов сельскохозяйственного производства.

Сюда входят:

- 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.

Химический состав некоторых видов растительных отходов приведены в таблице 1.

Таблица 1. *Химический состав основных видов отходов (% от общей массы)*

Компонент	Стержни кукурузных початков	Хлопковая шелуха	Солома пшеничная	Лузга		
				Подсолнечная	Овсяная	Рисовая
Целлюлоза	31,5	31,4	38,2	22,6	28,9	27,9
Лигнин	15,2	30,6	25,1	29,1	17,2	19,0
Пентозаны	34,8	21,4	23,6	18,4	33,6	27,1
Полиуроновые кислоты	7,4	7,7	4,6	10,1	5,4	4,4
Зола	1,1	2,5	5,2	2,1	7,7	18,0
Влажность	10	6,4	3,3	17,6	7,2	5,6

Пентозан- и лигнин содержащие отходы сельскохозяйственных производств обладают низкими адсорбционными и ионообменными свойствами к различным примесям, в следствии не достаточно развитой внутренней поверхности, не большим количеством ионогенных групп, способных к ионообменным процессам и реакциям комплексообразования. Увеличение адсорбционной и ионообменной способности пентозан- и лигнин содержащего сырья возможно при механохимической обработке его в среде модифицирующих ингредиентов.

Целью данной научной работы является исследование сорбционных и ионообменных свойств фильтрующих материалов на основе пентозан и лигнинсодержащих растительных отходов после механо-химической обработки в среде модифицирующих ингредиентов, изучение состава функциональных групп и механизма взаимодействия сорбента с вредными примесями.

Объект и методы исследования

Объектом исследования выбраны обработанные механохимическими методами подсолнечная, рисовая лузга и солома пшеницы в среде модифицирующих ингредиентов.

Эффективность очистки оценивалась по сточным водам, поступающим в открытые водоемы (водохранилища, реки, озера и т.п.) и модельным растворам. Модельные растворы готовили из расчета по концентраций вредным примесям близких к сточным водам с небольшим превышением показателей предельно допустимых сбросов, мг/дм^3: сухой остаток – 3,5; хлориды – 5,5; медь – 5,2; ртуть – 4,0; цинк – 15,5; СПАВ – 28; фтор – 210,8; роданиды – 46,0; никель – 3,2; фосфаты – 4,0.

Некоторые физико-механические свойства исходного сырья перед механохимической обработкой:

Хлопковая шелуха – состоит из твердой лигнофицированной оболочки семян хлопчатника (лузги) и покрывающего его дементa, состоящей практически из чистой целлюлозы.

Содержание делинта в шелухе обычно колеблется в пределах 10 - 35 %, содержание необрушенных семян (с ядрами) -5 – 10 %.

Частицы хлопковой шелухи имеют длину 15 - 30 мм, ширину -15 - 20 мм.

Насыпная плотность воздушной сухой шелухи -80 - 100 кг/м^3.

Стержни початков кукурузы (кукурузная кочерыжка) – образуется в качестве побочного продукта на крахмалопаточных и крупяных предприятиях.

Средние размеры стержней кукурузных початков:

- длина 40 - 400 мм;
- толщина 15-30 мм;
- масса 3 - 33 г.

Лузга семян подсолнечника (подсолнечная лузга) – отходы предприятия масложировой промышленности. Средний выход лузги составляет 30 % от перерабатываемых семян. Длина частиц лузги 6 - 8 мм; ширина 4 - 5 мм, насыпная плотность 100 кг/дм^3. При плющении на вальцах позволяет увеличить насыпную плотность до 130 - 140 кг/м^3.

Рисовая лузга – отходы предприятия крупяной промышленности. Размеры частиц 5-7 мм, насыпная плотность100 - 110 кг/м^3.

Солома зерновых культур (пшеницы) – имеет низкую насыпную плотность. При измельчении до размеров частиц 2 - 10 мм

насыпная плотность составляет 65 кг/м^3.

В качестве исходного сырья для механохимической обработки брали смесь- подсолнечная, рисовая лузга и солома пшеницы в соотношении 1:1:1 по массе. Состав модифицирующих ингредиентов и технологический режим обработки брали по варианту opt [4].

Элементарный и функциональный состав полученного целевого продукта (сорбента), результаты хроматографического анализа определяли по методикам [5, 6].

С целью реализации поставленных задач в процессе исследований была поставлена серия опытов и стендовых испытаний [2, 4].

Для определения статических и динамических параметров полученных сорбентов использовали атомно адсорбционный спектрофотометр (ААС) «Сатурн – 4ЭПАВ» с электротермическим и плазменным анализатором. Результаты обрабатывали на ПК «AnLab».

Природу функциональных групп и сорбционное взаимодействие лигнинсодержащих материалов в водной среде оценивали по принятым методикам [3, 8].

Радиометрические и радиационные параметры лабораторных и натурных исследований контролировались, на радиометрической установке КРК-1 и гамма – спектрометре «Канберра».

Эксперимент

Лабораторные исследования проводили в статических и динамических условиях, с использованием модельных растворов с набором концентраций показанных в разделе объекты и методы исследования. Стендовые испытания проводили на растворах с концентрациями вредных примесей близких сточным водам на намывном фильтре АНФн-1-0,5 с технологическими параметрами соответствующими лабораторным исследованиям в динамических условиях.

Элементный состав исходного сырья до и после механохимической обработки без и с модифицирующими добавками приведен в таблице 2.

Таблица 2. *Результаты функционального анализа*

Функциональные группы	Количество, мг-экв/г		
	*исх. продукт до механохимической обработки	исх. продукт после механохимической обработки без добавок модификаторов	исх. продукт после механохимической обработки с добвками модификаторов
Кислые *OH*-группы (*OH*-фенольные; *COOH*- гидроксильные)	0,89	0,92	13,85
Карбонилы =*CO*	0,14	0,11	1,94
Спиртовые гидроксилы (*OH* группы)	4,78	4,72	3,32
** связанный азот	0,51	0,49	4,41

Примечание:

*) исходное сырье до механохимической обработки: подсолнечная лузга, рисовая лузга, измельченная солома пшеницы в соотношении 1:1:1.

**) связанный азот зафиксирован в азотсодержащих функциональных группах: аммонийных-$COONH_4$; амидных – $CONH_2$; иминных =*C*=*NH*; имидных -*CO*-*NH*-*CO*-; аминных $\equiv C - NH_2$.

В результате технологического процесса (вариант opt [5]) механохимической обработки исходного сырья, происходят физико-химические превращения измельчаемого продукта.

При повышенном давлении, температуре и механическом воздействии происходит разрыв волокон целлюлоз, лигнина и других компонентов, входящих в макромолекулу структурного полимера: подсолнечная лузга, рисовая лузга, измельченная солома пшеницы, с образованием свободнорадикальных образований и структурных окислительно-востановительных систем [9].

Свободнорадикальные образования вступают в химические взаимодействия с ионизированными компонентами химических ингредиен-

тов - модификаторов (безводный карбонат аммония; безводный оксалат аммония; безводный карбамид; безводная щавелевая кислота; безводная этилендиаминотетрауксусная кислота) и образуют реакционноспособные функциональные группы на фрагментах макромолекулы.

Наряду с образованием свободных радикалов в системе протекает окислительный аммонолиз, который способствует образованию на макромолекуле растительного сырья реакционноспособных функциональных групп: *-OH* – фенольные, *-COOH* – карбоксильные, $-NH_2$- аминные, $\equiv NH$ - имминные и д.р., которые участвуют в процессах сорбционного взаимодействия в водной среде.

Природу функциональных групп, а так же структурную информацию взаимодействия полученных сорбентов с вредными примесями по методикам [3, 10]. Установлено, что лигнинсодержащий материал после механохимической обработки с модифицирующими ингредиентами представляет собой амфолит. В кислой среде подавляется диссоциация «кислых» функциональных групп и материал ведет как катион, в щелочной среде подавляется протонирование с образованием аммониевой группы и цвиттер-ион превращается в анион [8], что можно представить схемой. Результаты исследований приведены в таблицах 3, 4.

Результаты определения СОЕ исследуемого продукта для некоторых радионуклидов согласно ГОСТ 20.255.1-89 приведены в таблице 5.

$$H_3^+N(лиг.)COOH \underset{+H^+}{\overset{+H^+}{\rightleftharpoons}} H_3^+N(лиг.)COO^- \underset{+H^+}{\overset{+H^+}{\rightleftharpoons}} (лиг.)COO^-$$

кислая нейтральная щелочная

Таблица 3.*Концентрация катионов некоторых загрязнителей до и после очистки в динамических условиях при pH=8,0*

Исследуемая среда	Концентрация загрязнителей, мг/дм^3						
	Fe^{3+}	Cu^{2+}	Co^{2+}	Cd^{2+}	Mn^{2+}	Ni^{2+}	NH_4^+
ПДК (мг/дм^3)	0,5	0,1	0,1	0,001	0,1	0,1	2,0
Модельный раствор (мг/дм^3), V=5,0 дм^3	9,5	1,9	2,1	3,1	1,8	2,3	9,5
Фильтрат после очистки модельного раствора (мг/дм^3), (V=5,0 дм^3)	0,00	0,05	0,06	0,03	0,5	0,4	
Сточные воды, (мг/дм^3), V=5,0 дм^3	6,1	5,2	1,5	1,6	1,0	1,5	5,2
Фильтрат после очистки сточных вод, (мг/дм^3), V=5,0 дм^3	0,05	1,0	0,2	0,04	0,2	0,1	1,3

Таблица 4. *Концентрация анионов некоторых загрязнителей до и после очистки в динамических условий при pH=5,0*

Исследуемая среда	Концентрация загрязнителей, мг/дм^3				
	NO_3^-	Cl^-	CNS^-	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}
Модельный раствор (мг/дм^3), V=5,0 дм^3	190	270,5	150,8	230,5	10,5
ПДК (мг/дм^3)	50,0	17,8	0,01	95,5	3,0
Фильтрат после очистки модельного раствора (мг/дм^3), (V=5,0 дм^3)	90,0	22,5	0,15	75,7	2,9
Сточные воды, (мг/дм^3), V=5,0 дм^3	205,0	177,8	2,5	200,5	6,5
Фильтрат после очистки сточных вод, (мг/дм^3), V=5,0 дм^3	45,0	12,5	0,1	83,5	2,4

Таблица 5. *Результаты определения СОЕ для некоторых катионов при pH=6 масса навески сорбента m=1,0±0,01 г, $V_{раст}$=100 см^3*

Образцы	№№ опытов	Вес навески, г	СОЕ (мг-экв/г)					
			Cs^+	Sr^{2+}	Pb^{2+}	Cd^{2+}	Hg^{2+}	UO_2^{2+}
Исследуемый материал (сорбент)	1	0,999	4,9	5,8	6,85	3,85	4,2	6,25
	2	0,989	4,85	5,78	6,88	4,0	4,41	6,4
	3	1,001	4,95	5,95	6,95	3,95	4,4	6,3

В процессе изучения термодинамики адсорбционных процессов исходных данных при расчете термодинамических величин использовали хроматограф «Мелихром А-02» с ультрафиолетовым детектором, позволяющий осуществлять мгновенное детектирование в области 190 - 360 нм, с использованием термостата, который обеспечивает термостатирование в диапа-

зоне температур 310 - 365 К. В качестве образцов для исследования брали растворы $UO_2(NO_3)_2$, $CsNO_3$, $Sr(NO_3)_2$ с концентрацией 1,0±0,01 г/дм^3. При определении термодинамических характеристик адсорбции (ТХА) детектирование проводили в интервале длин волн 220, 250,300, 380 нм. Расчеты осуществляли по результатам полученных при λ = 350 нм.Расчетные термодинамические параметры сорбции ионов UO_2^{2+}, Cs^+, Sr^{2+} на пентозан и лигнинсодержащих материалах после механохимической обработки и величина предельной адсорбции приведены в таблице 6, 7. После определения концентраций получены значения динамической обменной емкости (ДОЕ) для современных ионитов приведены в [8].

Таблица 6. *Термодинамические параметры сорбции UO_2^{2+}; Cs^+; Sr^{2+} на пентозан и лигнинсодержащих материала*

ион	№№ опыта	ΔH, кДж/кмоль	ΔS, кДж/кмоль	ΔG, кДж/кмоль			
				300	320	340	350
UO_2^{2+}	1	3690	0,056	-14,2	-14,4	-15,0	-15,8
	2	3712	0,051	-14,3	-14,5	-15,3	-15,9
	3	3754	0,053	-14,1	-14,5	-15,3	-15,8
Cs^+	1	3685	0,058	-14,1	-14,3	-14,9	-15,1
	2	3701	0,049	-14,0	-14,4	-14,6	-15,2
	3	3698	0,054	-14,2	-14,5	-15,0	-15,2
Sr^{2+}	1	4029	0,056	-13,0	-13,1	-13,6	-13,9
	2	4036	0,059	-13,0	-13,3	-13,9	-14,1
	3	4024	0,06	-13,0	-13,3	-13,8	-14,2

Таблица 7. *Величины предельной адсорбции для некоторых загрязнителей.*

№№ п/п	Образцы	№№ опытов	Масса образца m, г	Величина предельной адсорбции (мг/г)
1.	Раствор $UO_2(NO_3)_2$ (С=1 г/дм^3, V=100 см^3)	1	1,01	6,46
		2	1,009	6,43
		3	1,01	6,47
2.	Раствор $CsNO_3$ (С=1 г/дм^3, V=100 см^3)	1	1,009	4,75
		2	1,011	4,78
		3	1,009	4,76
3.	Раствор $Sr(NO_3)_2$ (С=1 г/дм^3, V=100 см^3)	1	1,01	5, 25
		2	1,0095	5, 18
		3	1,01	5,23

По рассчитанным термодинамическим параметрам и результатам определения предельной адсорбции (таблица 6,7) можно предположить о внутридиффузной модели сорбции примесей находящихся в водных средах, что подтверждает результаты более ранних исследований.

Выводы

Проведенные исследования сорбционных и ионообменных свойств фильтрующих материалов на основе пентозан- и лигнинсодержащих растительных отход после механохимической обработки в среде модифицирующих ингредиентов позволяют сделать следующие выводы:

- механохимическая обработка сельскохозяйственных пентозан- и лигнинсодержащих отходов приводит к образованно ионообменного материала со свойствойствами амфолита, который в зависимость от *pH* среды может участвовать в процессах ионного обмена как катионит или анионит;
- наличие в структуре макромолекулы -*OH*-фенольных; -*COOH* – карбонильных; =*O*-нарбольных; -NH_2 – аминных и т.п. функциональных групп указывают на высокие адсорбционные и хелатообразующие свойства, что можно использовать для селективного выделения некоторых тяжелых металлов.

Полученные результаты исследований могут быть использованы в прогнозировании технологических процессов при расчете расхода сорбента для эффективного извлечения радионуклидов из технологических сред ЖРО и вредных примесей из промышленных стоков, с использованием оптимальных вариантов технологических схем очистки [11].

Простота изготовления, не сложное оборудование и неограниченная сырьевая база (ко-

сточки плодов сельскохозяйственных культур, подсолнечная, рисовая, овсяная лузга, кукурузная кочерыжка и т.д.), позволит экономически выгодно решать вопросы крупнотонажного производства.

Использование данного вида сорбционных материалов могут решить другую экологическую задачу – утилизация отходов сельскохозяйственного производства с получением полезного продукта.

Список литературы

1. Ерофеев В.А. Применение модифицированных природных сорбентов марки «Фолиокс» в системах очистки ЖРО / В.А. Ерофеев, А.М. Акимов, В.Ю. Клюев и др. // Экология и атомная энергетика. Научно-технологический сборник. Сосновый бор: 2001, вып.1, С. 91-94.
2. Культенко Э.А. Использование лигниновых сорбентов для очистки воды и технологических сред / Э.А. Культенко, В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина // Тезисы докладов V международной научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов. Одесса, 2012. С. 177-179.
3. Ерофеев В.А. Характер взаимодействие препаратов на основе лигнина с катионами металлов / Ерофеев В.А., Культенко Э.А., Ведищева О.В.// Збірник науковіх праць СНУЯЕП – Севастополь: СНУЯЭиП, 2014, вып. 2(50) – С 80-85.
4. Ерофеев В.А. Использование сорбционных материалов на основе плодовой косточки для очистки сточных вод / В.А. Ерофеев, Э.А. Культенко, Д.Ю. Сулавко // Энергетические установки и технологии. Севастполь, ИЯЭиП, 2015, Т1 №1, С.46-50.
5. Патент РФ №2589484 Способ получения селективного сорбента патент на изобретение/ В.А. Ерофеев, Э.А. Культенко, И.И. Пилипченко - заявл. № 2015119875 подано 26.06.2015; опубл. 9.06.2016.
6. Закис Г. Ф. Функциональный анализ лигнинов и их производных / Закис Г. Ф. – Рига: Зинатне, 1987. –230 с.
7. О теоретическом описании процессов внутридиффузионой сорбции и десорбции в ионообменных сорбентах / А. Н. Груздева, Р. Х. Хамизов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2008. Т. 8, № 1. С. 99–105.
8. Изучение механизма процессов сорбции радионуклидов на ионообменных лигниновых сорбентах / В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина, Д.Ю. Сулавко и др. // Энергетические установки и технологии. - Севастополь: СевГУ, 2016. Т. 2, № 2. С. 83–90.
9. Исследование эффективных сорбционных материалов для извлечения радионуклидов из технологических сред / Н.И. Черкашина, О.В. Ведищева // материалы конференции Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности. Севастополь, СевГУ, 2016. С. 229–232.
10. Физико-химическая модель взаимодействия препаратов лигнина в процессах очистки ЖРО / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев // Экология и развитие общества. 2015. №2 (13). С. 23 – 27.
11. Выбор оптимальной схемы технологического процесса очистки жидких радиоактивных отходов сложного состава лигниновыми сорбентами / В.А. Ерофеев, О.В. Ворник, О.В. Ведищева и др. // Энергетические установки и технологии. 2017. Т. 3, № 1. С. 107–117.
12. Очистка сточных вод фильтрующими материалами на основе природного полимера / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев, Э.А. Культенко // материалы конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности». Севастополь, СевГУ, 2016. С. 209–213.
13. Черкашина Н.И. Химико-технологический процесс получения сорбента на основе природного материал // Энергетические установки и технологии. Севастополь, СевГУ, 2016. Т. 2, № 2. С. 54–60.

References

1. Erofeev V. A. The use of the modified natural sorbents brand "Folioks" in systems of purification of LRW /, A. M., Akimov, V. Yu. Klyuev and others // Ecology and nuclear power. Scientific and technological collection. Pine forest: 2001, is.1, P. 91-94.
2. Kulichenko E. A. Use ligninase sorbents for water purification and technological environments / E. A. Kulichenko, V. A. Erofeev, N. And. Cherkashin // Abstracts of V international scientific conference of students, undergraduates and postgraduates. Odessa, 2012. P. 177 - 179.
3. Erofeev V. A. The nature of the interaction of drugs on the basis of lignin with cations of metals / Erofeev V. A., Kulichenko E. A. Vedischeva O. V.// Collection of scientific works of SNUNPI Sevastopol: SNUNPI, 2014, vol. 2 (50) – P. 80-85.
4. Erofeev V. A. The use of sorption materials based on fruit seeds for wastewater treatment / V. A. Erofeev, E. A., Kulenko, D. Y. Sulavko // Energy and technology. Sevastpol, Eeip, 2015, INE and I, 2015, Vol. 1, №. 1, P. 46-50.
5. The patent of the Russian Federation №2589484 The method of obtaining selective sorbent patent for the invention / V. A. Erofeev, E. A., Kulenko, I. I., Pilipenko.] № 2015119875 26.06.2015; publ. 9.07.2016.
6. Zakis G. F. Functional analysis of lignins and their derivatives / by G. F. Zakis, Riga: zinatne, 1987. - 230 P.
7. On the theoretical description of the processes of intra-diffusion sorption and desorption in ion-exchange sorbents / An Gruzdeva, R. H. Khamizov

/ / Sorption and chromatographic processes. 2008. Vol. 8, №. 1. P. 99-105.
8. Study of the mechanism of radionuclide sorption processes on ion-exchange lignin sorbents / V. A. Erofeev, N. And. Cherkashina, D. Yu. Sulavko et al. // Power plants and technologies. - Sevastopol: SSU, 2016. Vol. 2, №. 2. P. 83-90.
9. Cherkashina N. I. Physical and chemical model of interaction of lignin preparations in processes of purification of LRW / N. I. Cherkashina, V. A. Erofeev // Ecology and society development. 2015. №. 2 (13). P. 23 – 27.
10. Investigation of effective sorption materials for extraction of radionuclides from process media / N. And. Cherkashina, O. V. vedisheva / / proceedings of the conference Topical issues of nuclear chemical technologies and environmental safety. Sevastopol, SSU, 2016. P. 229-232.
11. Erofeev V. A. The choice of the optimum scheme of the technological process of purification of liquid radioactive waste of complex composition ligninase sorbents / V. A. Erofeev, A. V. Vornik, O. V. Vedischeva, etc. / / Energy and technology. 2017. Vol. 3, №. 1. P. 107-117.
12. Sewage treatment filter materials based on natural polymer / N. And. Cherkashin, V. A. Erofeev, E. A., Kulichenko // materials of conference "Topical issues of nuclear-chemical technologies and ecological safety". Sevastopol, SSU, 2016. P. 209-213.
13. Cherkashina N. And. Chemical and technological process of producing sorbent on the basis of natural material // Power plants and technologies. Sevastopol, SSU, 2016. Vol. 2, №. 2. P.54-60.

УДК 621.182.12:621.1.003

Математическое описание изменения β -активности модельных растворов при использовании нанопорошка диоксида кремния в присутствии нитрит-ионов и сульфат-ионов

С.А.Федорова[1], Е.А. Табацкая[2]
[1] *Севастопольский государственный университет, г.Севастополь, 299033, РФ, s.a.fedorova@sevsu.ru,*
[2]*Севастопольский государственный университет, г.Севастополь, 299033, РФ*

Статья поступила 09.04.2018 г.; после доработки 12.04.2018 г.

Аннотация
В работе приведены математические модели, которые позволяют оценить вклад каждого фактора (содержание нанопорошка диоксида кремния, содержание нитритов и сульфатов) на снижение β -активности модельных растворов. Количественно охарактеризованы изменения во времени и по содержанию анализируемых проб.

Ключевые слова: β-активность, нанопорошок диоксида кремния, нитрит-ион, сульфат-ион.

Mathematical description of the β-activity variation of model solutions using nanopowder silicon dioxide in the presence of nitrite ions and sulfate ions

S.A. Fedorova[1], A.A. Tabatskaya[2]
[1]Sevastopol State University, Sevastopol, 299033, Russian Federation, s.a.fedorova@sevsu.ru,
[2]Sevastopol State University, Sevastopol, 299033, Russian Federation

Received 09.04.2018 y.; received in final form 12.04.2018 y.

Abstract
The work presents mathematical models that allow to evaluate the contribution of each factor (the content of silicon dioxide nanopowder, the content of nitrites and sulphates) to the decrease of the β-activity of model solutions. The changes in time and in content of the analyzed samples are quantitatively characterized.

Keywords: β-activity, silicon dioxide nanopowder, nitrite-ion, sulfate-ion.

Введение

Актуальность исследования соответствует решению задачи снижения радиоактивной нагрузки на окружающею среду, определенной Положением о Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденному постановлением Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 г. N 401. "Основные правила учета и контроля снижения активности радиоактивных растворов" (НП-067-11) [1]. Снижение активности жидких радиоактивных отходов позволит перевести часть среднеактивных в низкоактивные отходы.

В исследованиях [2-6] показана возможность снижении активности модельных сред при использовании нанопорошка диоксида кремния. В нашей работе мы рассматриваем влияние элементов модельных сред на снижение β-активности исследуемого раствора. В частности, разнозарядные анионы - нитрит-ион и сульфат-ион.

Объектом исследования является β-активность модельных растворов. Модельные растворы представляют собой насыщенный рас-

твор KCl с различным содержанием нанопорошка диоксида кремния, нитритов и сульфатов.

Цель исследования: количественное определение изменения активности модельных растворов.

Задачи исследования:

1. Исследовать изменение β-активности модельных растворов с течением времени.

2. Разработать экспериментальные модели описания снижения β-активности модельного раствора в зависимости от различных факторов с течением времени.

Исследование изменение β-активности модельных растворов

Для определения количественной зависимости изменения β-активности модельных сред использовали полный факторный эксперимент (ПФЭ). Метод полного факторного эксперимента позволяет поучить математическое описание процесса в виде отрезка ряда Тейлора. Мы ограничимся линейной частью разложения и членами, содержащими произведения факторов в первой степени. Коэффициенты уравнения определяли на основе экспериментальных данных и, следовательно, они включают в себя погрешности эксперимента. Для удобства вычислений коэффициентов регрессии все факторы в ходе полного факторного эксперимента варьировали на двух уровнях, соответствующих значениям кодированных переменных +1 и -1.

Для исследования использовали модельные растворы, которые компоновали из различных массовых долей нанопорошка диоксида кремния, нитрита натрия, сульфата натрия и насыщенного раствора хлорида калия. Насыщенный раствор хлорида калия использовали для моделирования активности среды. Калий-40 содержался во всех пробах в одинаковом количестве. Поэтому изменение активности модельного раствора обуславливалось количественным и качественным составом компонентов. В качестве факторов использовали содержание нанопорошка диоксида кремния (1%, 5%), содержание однозарядных анионов нитрита натрия (5%, 10%) и двухзарядных анионов сульфата натрия (5%, 10%). Концентрации выбраны с учетом ранее проведенных исследований [6]. Изменение β-активности проводили на 1, 3, 7, 21 день.

Составили матрицу планирования (таблица 1) для трех факторов. Фактор X_1 - это нонопорошок SiO_2, X_2 – NO_2^-, X_3 – SO_4^{2-}. Нижний уровень -1, соответствует минимальным значениям массовых долей SiO_2 (1 %), NO_2^- (10 %), SO_4^{2-} (5 %). Верхний уровень +1, соответствует максимальным значениям концентрации SiO_2 (5%), NO_2^- (15 %), SO_4^{2-} (10 %).

Таблица 1. *Матрица планирования для трехфакторного эксперимента*

Опыт	X_1	X_2	X_3
1	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1
3	+1	-1	+1
4	+1	-1	-1
5	-1	+1	+1
6	-1	+1	-1
7	-1	-1	+1
8	-1	-1	-1

Выдвинули гипотезу о структуре модели $y=f(x_1, x_2, x_3)$:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

Существенным условием реализации плана эксперимента является повторяемость в координатах точек, указанных планом. Это позволило осуществить ряд статистических процедур, на основании которых можно делать вывод о точности модели и адекватности ее исследуемому процессу. Кроме того, при реализации эксперимента соблюдался принцип рандомизации. Согласно этому принципу, опыты проводили в случайном порядке, что позволило избежать существенных ошибок в оценках коэффициентов модели.

Таким образом, для решения поставленных задач необходимо:

1. Определить базовый и варьируемый состав модельных сред.

2. В качестве факторов ПФЭ выбрать варьируемый состав модельный растворов.

3. Определить периодичность замеров для определения β-активности (целевой функции).

4. Составить пробы для контрольных замеров.

5. Приготовить модельные растворы с учетом параллельных проб.

Методика проведения эксперимента

Измерения активности проводили на радиометре УМФ – 2000, на котором можно одновременно измерять альфа- и бета-активности образца. В приборе используется имеется полупроводниковый ионно-легированный крем-

ниевый детектор. Имеется активная защита от фонового излучения на основе газоразрядных счетчиков и схемы антисовпадений; пассивная свинцовая защита от фонового излучения (30 мм свинца). Счет импульсов осуществляет двухканальное пересчетное устройство для счета числа импульсов от зарегистрированных альфа- и бета-частиц с таймером.

Контрольное измерения фона проводили за время 1000с., при этом пустая подложка погружалась в счетное положение.

После приготовления модельных растворов из каждой колбы отбирали на металлическую подложку пробу 0,2мл и сушили в сушильном шкафу. Затем проводили измерения на приборе УМФ-2000 за 1000сек.

Фон за 1000сек равен 32 β-имп. Количество β-импульсов за 1000сек в каждой пробе для первой серии опытов представлено в таблице 1.

Таблица 1. *Количество β-импульсов для первой серии опытов.*

Опыт	С,%				Измерения							
	KCl	SiO_2	NO_2^-	SO_4^{2-}	1 день		3 дня		7 дней		21 день	
1	24	5	15	10	115	113	110	109	105	107	101	99
2	24	5	15	5	119	120	112	114	108	109	102	103
3	24	5	10	10	117	118	110	112	106	108	100	99
4	24	5	10	5	115	117	108	111	106	104	96	100
5	24	1	15	10	122	126	124	125	119	120	114	116
6	24	1	15	5	128	127	128	125	122	124	121	119
7	24	1	10	10	126	127	124	127	119	121	116	117
8	24	1	10	5	124	126	124	125	120	120	116	117

Анализ результатов приведен ниже по данным, полученным в соответствии с методикой пересчета.

Для того что бы рассчитать активность, необходимо знать среднее значение счета от счетного образца без фона[7]:

$$N = N_{сч} - N_{ф}$$

где $N_{сч}$–счет от i-го измерения, имп.,

$N_{ф}$ – счет от i-го фона, имп.,

Для первой серии опытов

$N_{\beta} = 115 - 32 = 83$ имп.

Далее рассчитываем бета активность счетного образца в Бк для бета канала по формуле [7]:

$$A_{\beta} = \frac{N_{\beta}}{t \cdot E_{ff\beta}}, Бк$$

где N_{β}- счет для бета канала, имп.,

$E_{ff\beta}$- чувствительность к бета-излучению (табличное значение равное $8{,}2\ 10^{-3}$),

t- время измерения (1000 сек).

В соответствии с вышеприведенными формулами были определены β-активности модельных сред. Зависимости, приведенные на рис. 1, соответствуют следующим составам модельных растворов: 1 - SiO_2 (1%), NO_2^- (15%), SO_4^{2-} (5%); 2 - SiO_2 (1%), NO_2^- (10%), SO_4^{2-} (10%); 3 - SiO_2 (1%), NO_2^- (10%), SO_4^{2-} (5%); 4 - SiO_2 (1%), NO_2^- (15%), SO_4^{2-} (10%); 5 - SiO_2 (5%), NO_2^- (15%), SO_4^{2-} (5%); 6 - SiO_2 (5%), NO_2^- (10%), SO_4^{2-} (10%); 7 - SiO_2 (5%), NO_2^- (10%), SO_4^{2-} (5%); 8 - SiO_2 (5%), NO_2^- (15%), SO_4^{2-} (10%); содержание KCl во всех пробах одинаково.

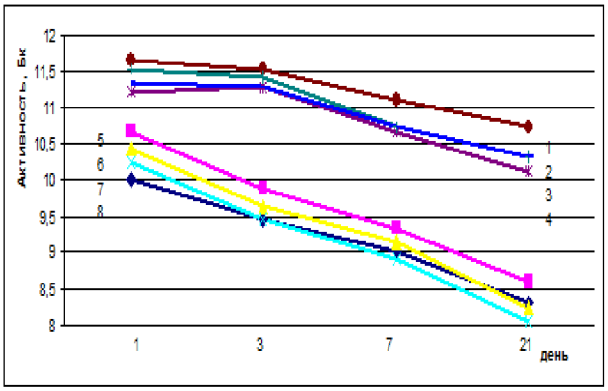


Рис. 1. Изменение β-активности (Бк) счетного образца для различных значения факторов при реализации ПФЭ в период от 1 до 21 дня.

Как следует из приведенных результатов, в присутствии разноименных анионов снижение активности обуславливается массовой долей диоксида кремния: группы кривых 5 - 8 (5 % нанопорошка SiO_2) и 1-4 (1% нанопорошка SiO_2) четко разграничены. При 5 % - ом содержании нанопорошка диоксида кремния наблюдается снижение активности в среднем на 20 %, а при 1 % - ом - порядка 10%. При равных концентрациях нитрит-ионов активность модельного раствора ниже там, где концентрация сульфат- иона максимальна. Т.е., на снижение активности модельных растворов положительное влияние оказывают двухзарядные анионы по сравнению с однозарядными.

Для количественной характеристики влияния на снижения β-активности модельного раствора нанопорошка диоксида кремния в присутствии нитритов и сульфатов процесса мы руководствовались методикой расчета ПФЭ.

Для каждой серии параллельных опытов вычисляли среднее арифметическое функций

отклика:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} y_{ji} \quad , \text{j=1,2,...,N,}$$

где k - число параллельных опытов, проведенных при одинаковых условиях.

Затем вычисляли оценку дисперсий для каждой серии параллельных опытов:

$$s_j^2 = \frac{1}{k-1}\sum_{i=1}^{k}\left(y_{ji} - \bar{y}_j\right)^2 \quad , \text{j=1,2,...,N}$$

Гипотеза о воспроизводимости опытов была принята с доверительной вероятностью p=0.95. Для проверки воспроизводимости опытов находили отношение наибольшей из оценок дисперсий к сумме всех оценок дисперсий - расчетное значение критерия Кохрена:

$$G_p = \frac{\max s_j^2}{\sum_{j=1}^{k} s_j^2}$$

Для нахождения табличного значения критерия Кохрена (G) необходимо знать общее количество оценок дисперсий N и число степеней свободы f, связанных с каждой из них, причем f = k - 1.

Если выполняется условие $G_p \le G$, то опыты считаются воспроизводимыми, а оценки дисперсий - однородными. Расчетное значение критерия Кохрена 0,121, табличное - 0,680. Следовательно, опыты воспроизводимы, оценки дисперсий - однородны.

Используя свойство ортогональности матрицы планирования полного факторного эксперимента вычислили коэффициенты регрессии:

$$b_0 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} y_i$$

$$b_{im} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} X_{ji} \cdot X_{jm} y_i \ .$$

$$y = 28{,}87 - 2{,}60x_1 + 0{,}16x_2 - 0{,}14x_3 + 0{,}01x_1x_2 -$$
$$- 0{,}16x_2x_3 - 0{,}30x_1x_3 - 0{,}04x_1x_2x_3$$

После вычисления коэффициентов провели статистический анализ этого уравнения, который включал следующие этапы:

- оценивание адекватность модели;
- оценивание значимости факторов, входящих в уравнение регрессии.

Проверку адекватности регрессионного уравнения осуществляли с помощью критерия Фишера (F_P) по условию:

$$F_P \ge F_{ТАБЛ},$$

где

$$F_P = \frac{max\left(S_{АД}^2, S_{\bar{Y}}^2\right)}{min\left(S_{АД}^2, S_{\bar{Y}}^2\right)},$$

где $S_{\bar{Y}}^2$ - дисперсия среднего,

$$s_{\bar{Y}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(y_i^{ЭКСП} - \overline{y_i}\right)^2}{N-1},$$

$S_{АД}^2$ - дисперсия адекватности,

$$s_{АД}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(y_i^{ЭКСП} - y_i^{РАСЧ}\right)^2}{N-m},$$

где N – количество экспериментальных точек;

m – число коэффициентов регрессии в уравнении, включая свободный член.

В нашем случае $F_P = \frac{1{,}010}{0{,}515} = 1{,}96$. Табличное значение критерия Фишера 1,78. $1{,}96 \ge 1{,}78$. Следовательно, модель адекватно описывает процесс.

Оценку значимости факторов, используемых при описании функции отклика, осуществляли с помощью критерия Стьюдента (t_P) по условию $t_P \succ t_{ТАБЛ}$, где

$$t_P = \frac{\left|b_j\right|}{\delta_{b_J}^2},$$

где b_J – коэффициент регрессии при оцениваемом факторе;

$\delta_{b_J}^2$ – среднеквадратическое отклонение коэффициента регрессии.

$t_{ТАБЛ}$ - значение критерия Стьюдента с уровнем вероятности 0,95 равно 2,039.

В ходе проведенных расчетов мы получили, что коэффициент b_{13} незначим. После исключения всех незначимых членов, уравнение регрессии приобретает новый вид:

$$y = 28{,}87 - 2{,}60x_1 + 0{,}16x_2 - 0{,}14x_3 +$$
$$+ 0{,}01x_1x_2 - 0{,}16x_2x_3 - 0{,}04x_1x_2x_3 \qquad (1)$$

Таким образом, рассматриваемый процесс адекватно описывается уравнением (1), но использовать его для прогноза не следует.

Наибольшее влияние на снижения β-активности модельного раствора оказывает нанопорошок диоксида кремния, сопоставимо значимо, но на порядок ниже, влияние нитритов и сульфатов. При одновременном присутствии нитритов и сульфатов возможен синергетический эффект.

В ходе выполнения работы были проанализированы аппроксимационные зависимости изменения β-активности при наложение различных факторов во времени, представленные на рис. 1. Были рассмотрены линейная, экспоненциальная и полиномиальная структуры (таблица 2).

***Таблица 2**. Аппроксимация зависимости изменения β-активности модельных растворов различных составов математическими моделями различных структур*

Проба	Уравнение	R^2
1	y = -0,3171x + 12,043	0,9589
	$y = 12{,}069e^{-0{,}0283x}$	0,9566
	$y = 0{,}061x^3-0{,}5183x^2+ ,0061x+11{,}098$	1
2	y = -0,4329x + 12,073	0,9449
	$y = 12{,}123e^{-0{,}0396x}$	0,9436
	$y = 0{,}1321x^3-1{,}0671x^2+2{,}1545x+ 0{,}305$	1
3	y = -0,4268x + 11,921	0,9211
	$y = 11{,}973e^{-0{,}0397x}$	0,9181
	$y = 0{,}1016x^3-0{,}8841x^2+1{,}8801x+ 0{,}244$	1
4	y = -0,3293x + 11,707	0,8627
	y = 11,739e-0,0305x	0,8631
	$y = 0{,}122x^3-1{,}0366x^2+2{,}3171x+9{,}8171$	1
5	y = -0,6768x + 11,311	0,9956
	$y = 11{,}438e^{-0{,}0705x}$	0,9958
	$y = -0{,}0711x^3+0{,}5488x^2-1{,}9411x+12{,}134$	1
6	y = -0,7073x + 11,128	0,988
	$y = 11{,}28e^{-0{,}0761x}$	0,9831
	$y = -0{,}122x^3+0{,}8841x^2-2{,}5915x+12{,}256$	1
7	y = -0,7134x + 10,945	0,9938
	$y = 11{,}101e^{-0{,}0783x}$	0,9905
	$y = -0{,}0915x^3+0{,}6707x^2-2{,}1646x+11{,}829$	1
8	y = -0,5549x + 10,579	0,9888
	$y = 10{,}676e^{-0{,}0608x}$	0,9832
	$y = -0{,}0711x^3+0{,}4878x^2-1{,}5142x+11{,}098$	1

Предложенные зависимости достаточно хорошо (R^2 от 0,86 до 1,00) описываются процесс изменения β-активности модельных растворов в присутствии нанопорошка диоксида кремния, нитритов и сульфатов. Однако, информативность выше у моделей полиномиальной структуры (коэффициент детерминации равен 1).

Кроме того, дисперсии линейный моделей 10^{-3} порядка, а экспоненциальной и полиномиальной структур - 10^{-3} - 10^{-6}.

При описании процессов полиномиальной структурой прослеживается группирование зависимостей (рис. 1) 1 - 4 (1 % содержания нанопорошка диоксида кремния) и 5 - 8 (5 % содержания нанопорошка диоксида кремния).

Поэтому считаем, что аппроксимировать процесс изменения β-активности модельных растворов с 1 % содержанием нанопорошка диоксида кремния следует уравнением (2), а процесс изменения β-активности модельных растворов с 5 % содержанием нанопорошка диоксида кремния следует уравнением (3).

$$y = 10{,}37 + 1{,}84x - 0{,}88x^2 + 0{,}10x^3 \quad (2)$$

$$y = 11{,}83 - 2{,}05x + 0{,}65x^2 - 0{,}09x^3 \quad (3)$$

Далее мы исследовали изменение β-активности в зависимости от состава проб на протяжении 21 дня (рис. 2).

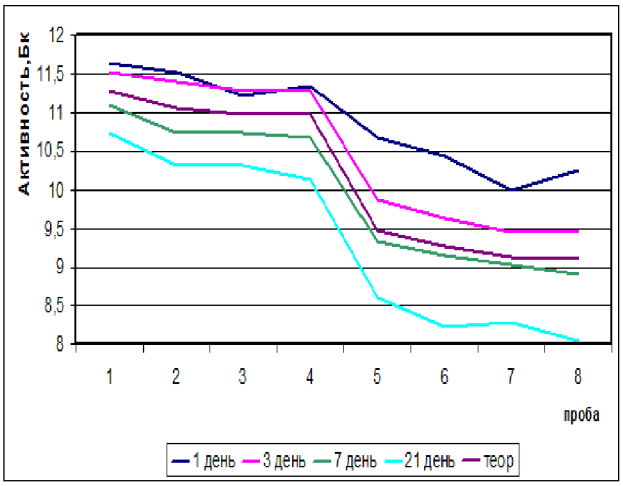


Рис. 2. Изменение β-активности (Бк) счетного образца для исследуемых проб на различных временных интервалах.

Как следует из предложенных зависимостей, параметры моделей, описывающих характер изменения β-активности от 1 го до 21-го дня одного порядка.

Коэффициенты для величин 6-го и 5-го порядка полиномиальной структуры примерно одинаковы для всех зависимостей.

Следовательно, целесообразно ограничиться полиномиальной структурой 4-го порядка.

Значение множественного коэффициента корреляции у структур полиномиального вида ближе к 1, следовательно, информативность этим моделей несколько выше, чем у линейной и экспоненциальной структур.

Результаты расчетов, проведенных по полученным структурам (в таблице 3 представлены в графе «теор») показали лучшее согласова-

ние расчетных и экспериментальных данных для структуры вида:

$$y = 14{,}31 - 5{,}50x + 3{,}10x^2 - 0{,}66x^3 + \\ + 0{,}028x^4 + 0{,}006x^5 - 0{,}0005x^6 \quad (4)$$

Таблица 3. *Аппроксимация зависимости изменения β-активности модельных растворов на различных временных интервалах математическими моделями различных структур*

День	Уравнение	R^2
1	y = -0,2439x + 11,982	0,9057
	$y = 12{,}025e^{-0{,}0225x}$	0,9019
	$y= -0{,}0007x^6+ 0{,}0188x^5- 0{,}1995x^4+1{,}0151x^3 - 2{,}6024x^2 + 2{,}9928x +10{,}427$	0,9726
3	y = -0,3644x + 12,128	0,8691
	$y = 12{,}227e^{-0{,}0349x}$	0,8701
	$y = -0{,}0006x^6 + 0{,}01x^5 - 0{,}0314x^4 - 0{,}2616x^3 + 1{,}7686x^2 - 3{,}459x + 13{,}506$	0,9691
7	y = -0,3571x + 11,561	0,8864
	$y = 11{,}66e^{-0{,}036x}$	0,8873
	$y = 8E\text{-}05x^6 - 0{,}0097x^5 + 0{,}1946x^4 - 1{,}5521x^3 + 5{,}6014x^2 - 8{,}9836x + 15{,}854$	0,9736
21	y = -0,4355x + 11,289	0,8899
	$y = 11{,}446e^{-0{,}0469x}$	0,8896
	$y = -0{,}0007x^6 + 0{,}0085x^5 + 0{,}0298x^4 - 0{,}8372x^3 + 4{,}0441x^2 - 7{,}4152x + 14{,}909$	0,9853
теор	y = -0,3742x + 11,848	0,8609
	$y = 11{,}953e^{-0{,}037x}$	0,8616
	$y = -0{,}0005x^6 + 0{,}0059x^5 + 0{,}0279x^4 - 0{,}661x^3 + 3{,}0966x^2 - 5{,}5019x + 14{,}314$	0,9676

Выводы

В ходе проведенных исследований определено изменение β-активности модельных растворов с течением времени в период от 1-го до 21 дня.

Показано, что в в присутствии нитрит и сульфат-ионов снижение β-активности, в основном, определяется содержанием нанопорошка диоксида кремния (рис. 1, семейства кривых 1-4 и 5-8).

Так, β-активность модельного раствора уменьшилась в среднем на 20 % при массовой доле нанопорошка SiO_2 5 %, на 10 % -при массовой доле нанопорошка SiO_2 1 %.

С использованием ПФЭ разработана математическая модель (1), характеризующая вклад различных факторов (нанопорошок диоксида кремния, нитрит и сульфат-ионы) на изменение β-активности модельного раствора.

Определены характеристические зависимости (2,3,4) изменения β-активности модельного раствора на различных временных интервалах и при различных составах модельных сред.

Показано, что процессы хорошо описываются уравнениями полиномиальной структуры четвертого и третьего порядка соответственно. В первом случае коэффициент детерминации, характеризующий информативность модель, составляет 0,97, а во втором - 1.

Список литературы

1. Положение о Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденное постановлением Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 г. N 401. "Основные правила учета и контроля снижения активности радиоактивных растворов" (НП-067-11). mos.gosnadzor.ru
2. Федорова С.А. Использование нанопорошка диоксида кремния при дезактивации модельных растворов / С.А.Федорова, Е.А.Магдыч, Е.П.Вовк // Экология и развитие общества. МАНЭБ. - 2016. - № 2(17) . - С. 45-48.
3. Федорова С.А. Использование нанопорошка оксида кремния для снижения активности технологических сред / С.А.Федорова, А.Н.Стрюк // Материалы научно-технической конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности», г. Севастополь, 15-18 июня 2016 г. – Севастополь: СевГУ - 2016. - С. 66-70.
4. Федорова С.А. Использование нанопорошка оксида кремния для очистки водних сред, загрязненных радионуклидами/С.А.Федорова, Е.П.Вовк // НИР «Использование нанопорошка оксида кремния для очистки водних сред, загрязненных радионуклидами», шифр «Кремний», ч.1, 52с. Зарегистр. В СНУЯЭиП от 03.12.14г., №9.
5. Федорова С.А. Исследование изменения β-активности модельных растворов при использовании нанопорошка диоксида кремния в присутствии катионов Na^+, Mg^{2+} и Fe^{3+}/ С.А.Федорова, Е.А. Магдыч, Ю.А. Кухта // Энергетические установки и технологии. 2017. Т. 3. №3. С. 79-83.
6. Федорова С.А.Анализ влияния на снижение вактивности модельных растворов нанопорошка диоксида кремния в присутствии анионов NO_2^-, SO_4^{2-} / С.А. Федорова, А.А. Табацкая // Инновационные подходы в современной науке: сб. ст. по материалам XVII Международной научно-практической конференции «Инновационные подходы в современной науке». – № 5(17). – М., Изд. «Интернаука», 2018.- С.68-72.
7. ФВКМ.412121.001РЭ.Руководство по эксплуатации альфа-бета радиометр для измерения малых активностей,2015- 3с.

References

1. Regulations on the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision approved by the Resolution of the Government of the Rus-

sian Federation of July 30, 2004 No. 401. "Basic Rules for Accounting and Control of Decrease in Activity of Radioactive Solutions" (NP-067-11). mos.gosnadzor.ru

2. Fedorova S.A. Use of silicon dioxide nanopowder with deactivation of model solutions / SA Fedorova, EA MAGDYCH, EVP.Vovk // Ecology and society development. MANEB. - 2016. - No. 2 (17). - P. 45-48.
3. Fedorova S.A. Use of silicon oxide nano-powder to reduce the activity of technological media / SA Fedorova, AN Stryuk // Materials of the scientific and technical conference "Actual problems of nuclear-chemical technologies and ecological safety" Sevastopol, on June 15-18, 2016 - Sevastopol: SevGU - 2016. - P. 66-70.
4. Fedorova S.A. The use of silicon oxide nanopowder for the purification of aquatic environments contaminated with radionuclides / SA Fedorova, EPVovk // Research "Use of silicon oxide nanopowder for the purification of aquatic environments contaminated with radionuclides", the code "Silicon", h .1, 52c. For-the-register. In SNJAEiP of 03.12.14g., No. 9.
5. Fedorova S.A. Investigation of the change in the beta activity of model solutions using silicon nanopowder in the presence of Na^{+}, Mg^{2+} and Fe^{3+} cations / SA Fedorova, E.A. Magdych, Yu.A. Kukhta // Power plants and technologies. 2017. T. 3. № 3. Pp. 79-83.
6. Fedorova SA Analysis of the influence on the decrease in the activity of model solutions of silicon dioxide nanopowder in the presence of NO_2^-, SO_4^{2-} / SA anions. Fedorova, A.A. Tabatskaya // Innovative approaches in modern science: Sat. Art. on the materials of the XVII International Scientific and Practical Conference "Innovative approaches in modern science". - No. 5 (17). - M., Ed. "Internauka", 2018.- P.68-72.
7. FVKM.412121.001RE. Manual on the use of alpha-beta radiometer for measuring small activities, 2015- 3s.

УДК 621.182.12:543.574.(076.5)

Корреляционный анализ глубоководного сброса после очистных систем г. Ялты

С.А.Федорова[1], И.В.Шумар[2]
[1] *Севастопольский государственный университет, г.Севастополь, 299033, РФ, s.a.fedorova@sevsu.ru,*
[2]*Севастопольский государственный университет, г.Севастополь, 299033, РФ*

Статья поступила 30.04.2018 г.; после доработки 05.05.2018 г.

Аннотация

Определена теснота линейной связи контролируемых параметров в точках сброса. Выявлены тесные прямые и обратные корреляционные связи между содержанием растворенного кислорода, аммонийным и нитратным азотом, фосфатами поверхностно-активными веществами. Зависимости описаны полиномиальными уравнениями 4-го порядка.

Ключевые слова: pH, содержание взвешенных веществ, фосфаты, растворенный кислород, азот аммонийный, азот нитритный, азот нитратный, нефтепродукты, биологическое потребление кислорода, анионные поверхностно-активные вещества.

Correlation analysis of deep-water discharge after treatment systems in Yalta

S.A. Fedorova[1], I.V.Shumar[2]
[1]Sevastopol State University, Sevastopol, 299033, Russian Federation, s.a.fedorova@sevsu.ru,
[2]Sevastopol State University, Sevastopol, 299033, Russian Federation

Received 30.04.2018 y.; received in final form 05.05.2018 y.

Abstract

The tightness of the linear connection of the controlled parameters at the discharge points is determined. Close and direct correlation correlations between the content of dissolved oxygen, ammonium and nitrate nitrogen, and phosphates with surface-active substances have been revealed. Dependencies are described by polynomial equations of the fourth order.

Keywords: pH, suspended matter content, phosphates, dissolved oxygen, ammonium nitrogen, nitrogenous nitric, nitrogen nitrate, oil products, biological oxygen consumption, anionic surfactants.

Введение

Актуальность исследования обусловлена решением задач контроля распределения загрязнителей сточных вод в соответствии с Положением о Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденному постановлением Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 г. N 401. [1, 2].

Существуют различные методы и способы очистки сточных вод. Однако, судить о качестве очистки, по нашему мнению, можно только по анализу результатов в точках сброса.

В исследованиях [3, 4] охарактеризованы регламенты контроля за работой систем очистки и показана количественная оценка многолетней изменчивости гидрохимических показателей в заливе, которая определялась по интенсивности их изменчивости для двух временных рядов.

В работах [5-7] показана возможность использования корреляционного и регрессионного анализов для количественной характеристики

взаимовлияния различных факторов.

Объектом исследования является глубоководный сброс после очистных систем г. Ялты.

Цель исследования: определение наличия (отсутствия) корреляционной зависимости между анализируемыми параметрами в точках глубоководного сброса г.Ялта.

Задачи исследования:

1. Определение тесноты связи между исследуемыми параметрами.
2. Определение характеристических уравнений анализируемых параметров глубоководного сброса сточных вод г. Ялты.

Определение тесноты связи между исследуемыми параметрами

В ходе исследования были проанализированы результаты Ялтинской химико-бактериологической лаборатории по следующим параметрам: реакция среды (pH), фосфаты, содержание взвешенных веществ, растворенного кислорода, азота аммонийного, азота нитритного, азот нитратного, нефтепродуктов, биологическое потребление кислорода (БПК), анионные поверхностно-активные вещества (АПАВ).

Точки отбора:

- «Выпуск – 6 км»,
- «Восточнее выпуска на 250 м»,
- «Западнее выпуска на 250 м»,
- «Мористее выпуска на 250 м»,
- «2-ой км по трассе выпуска».

Анализируемые значения представляли выбору с 2006 года по 2017 год включительно.

Поскольку значения величин изменяются с интервалов с несколько порядков (от pH 8,2 ед. pH до 0,03 мг/дм^3 концентрации фосфат-ионов), то для сопоставления численных характеристик значения параметров необходимо нормировать. Варьированный интервал мы выбрали от -1 до 1.

Для выявления наличия/отсутствия связи между измеряемыми параметрами мы провели корреляционной анализ в точках отбора проб. Результаты приведены в таблицах 1 - 5.

В корреляционных матрицах использованы следующие обозначения:

1 - реакция среды (pH);
2 - содержание взвешенных веществ;
3 - концентрация фосфатов;
4 - концентрация растворенного кислорода;
5 - концентрация азота аммонийного:
6 - концентрация азота нитритного;
7 - концентрация азот нитратного;
8 - содержание нефтепродуктов;
9 - биологическое потребление кислорода (БПК);
10 - АПАВ.

Как следует из приведенных значений (таблица 1), в районе «Выпуск - 6 км» тесная прямая корреляционная связь наблюдается между АПАВ и содержанием взвешенных частиц. Между АПАВ, концентрацией фосфатов и азотом аммонийным и нитратным отмечается тесная обратная корреляционная связь.

Таблица 1. *Корреляционная матрица параметров по 5 точкам Ялтинского залива и прилегающих акваторий: Выпуск - 6 км*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,00									
2	-0,12	1,00								
3	0,09	-0,60	1,00							
4	0,52	-0,07	0,66	1,00						
5	-0,11	0,29	-0,53	-0,32	1,00					
6	0,67	-0,49	0,65	0,84	-0,13	1,00				
7	0,37	-0,49	0,71	0,43	0,07	0,67	1,00			
8	0,61	-0,10	0,56	0,74	-0,37	0,73	0,60	1,00		
9	0,32	0,08	-0,46	0,03	-0,21	0,11	-0,36	-0,26	1,00	
10	-0,32	0,85	-0,84	-0,50	0,20	-0,71	-0,75	-0,40	0,14	1,00

Прямая тесная и значительная корреляционная связь присутствует между содержанием кислорода, нитратным и аммонийным азотом.

Значительная обратная корреляционная связь отмечается между фосфатами и взвешенными частицами.

В точке отбора проб «Восточнее выпуска 250 м» (таблица 2) тесная прямая корреляционная связь наблюдается между АПАВ и содержанием взвешенных частиц.

Таблица 2. *Корреляционная матрица параметров по 5 точкам Ялтинского залива и прилегающих акваторий: Восточнее выпуска на 250 м*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,00									
2	-0,15	1,00								
3	-0,34	-0,59	1,00							
4	0,11	-0,01	0,49	1,00						
5	-0,07	0,17	-0,61	-0,28	1,00					
6	0,12	-0,45	0,61	0,83	-0,13	1,00				
7	-0,15	-0,57	0,64	0,39	0,02	0,59	1,00			
8	-0,01	-0,07	0,48	0,76	-0,39	0,74	0,56	1,00		
9	0,46	0,09	-0,34	-0,08	-0,16	-0,04	-0,35	-0,37	1,00	
10	0,11	0,73	-0,80	-0,53	0,03	-0,80	-0,80	-0,48	0,09	1,00

Между АПАВ, концентрацией фосфатов и азотом аммонийным и нитратным отмечается тесная обратная корреляционная связь.

Прямая тесная и значительная корреляционная связь присутствует между содержанием кислорода и нитратным и аммонийным азотом.

В отличие от корреляционных связей, приведенных в таблице 1, значения парных коэффициентов корреляции несколько выше (на 5 – 15 %).

Обратная корреляционная связь между фосфатами и взвешенными частицами уменьшается, становится умеренной, как и между фосфатами и БПК.

Возможно, часть растворенного кислорода переходит в БПК.

В районе «Западнее выпуска на 250 м» (таблица 3) направления корреляционных зависимостей сохраняются.

Таблица 3. *Корреляционная матрица параметров по 5 точкам Ялтинского залива и прилегающих акваторий: Западнее выпуска на 250 м*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,00									
2	-0,55	1,00								
3	-0,23	-0,52	1,00							
4	0,05	0,03	0,55	1,00						
5	0,02	0,20	-0,52	-0,33	1,00					
6	0,33	-0,42	0,50	0,84	-0,11	1,00				
7	0,25	-0,61	0,55	0,31	0,25	0,58	1,00			
8	0,19	-0,16	0,42	0,78	-0,36	0,76	0,49	1,00		
9	0,46	-0,05	-0,36	-0,12	-0,29	0,00	-0,47	-0,32	1,00	
10	-0,14	0,75	-0,87	-0,54	0,09	-0,71	-0,76	-0,45	0,21	1,00

Однако в количественном отношении корреляционная связь фосфатами, растворенным кислородом азотом аммонийным и нитратным становится умеренной.

Значение коэффициента парной корреляции между АПАВ и растворенным кислородом практически не изменяется.

Теснота корреляционной связи между АПАВ, содержанием взвешенных частиц, концентрацией фосфатов и азотом аммонийным и нитратным в отличие от этих же параметров в точке «Восточнее выпуска 250 м» увеличивается на 4 – 10%.

Значения корреляционной матрицы в точке «Мористее выпуска на 250 м» (таблица 4) ближе к значениям в точке «Выпуск 6 км».

Основные тенденции сохраняются. Но, связь между фосфатами и нитратным азотом становится умеренной, а по отношению к БПК увеличивается.

Корреляционная связь между АПАВ, содержанием взвешенных частиц, концентрацией фосфатов и азотом аммонийным и нитратным уменьшается (до 10 %), но по-прежнему остается тесной.

По-прежнему отмечается прямая тесная корреляционная связь между содержанием кислорода, нитратным и аммонийным азотом.

Таблица 4. *Корреляционная матрица параметров по 5 точкам Ялтинского залива и прилегающих акваторий: Мористее выпуска на 250 м*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,00									
2	-0,44	1,00								
3	-0,06	-0,59	1,00							
4	0,35	0,00	0,46	1,00						
5	0,14	0,24	-0,68	-0,23	1,00					
6	0,43	-0,37	0,45	0,88	-0,09	1,00				
7	0,57	-0,66	0,55	0,35	0,13	0,48	1,00			
8	0,38	-0,03	0,46	0,74	-0,41	0,68	0,41	1,00		
9	0,18	0,08	-0,49	-0,10	0,04	-0,15	-0,48	-0,49	1,00	
10	-0,19	0,76	-0,83	-0,52	0,22	-0,72	-0,68	-0,42	0,37	1,00

В точке «2-ой км по трассе выпуска» (таблица 5) между АПАВ и фосфатами наблюдается тесная обратная корреляционная связь такого же порядка, что и в точке «Выпуск - 6 км».

Таблица 5. *Корреляционная матрица параметров по 5 точкам Ялтинского залива и прилегающих акваторий: 2-ой км по трассе выпуска*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,00									
2	-0,60	1,00								
3	0,09	-0,52	1,00							
4	0,14	0,17	0,49	1,00						
5	0,18	0,19	-0,64	-0,45	1,00					
6	0,40	-0,30	0,50	0,79	-0,35	1,00				
7	0,71	-0,55	0,56	0,38	0,08	0,47	1,00			
8	0,23	0,00	0,45	0,86	-0,43	0,68	0,44	1,00		
9	-0,15	0,14	-0,49	-0,39	-0,13	-0,30	-0,63	-0,54	1,00	
10	-0,33	0,71	-0,82	-0,33	0,26	-0,63	-0,68	-0,34	0,61	1,00

Связь межу АПАВ взвешенными частицами, азотом аммонийным и нитратным становится умеренной (уменьшается от 15 до 6 %). Кроме того, становится заметной связь между АПАВ и нефтепродуктами.

Прямая тесная корреляционная связь присутствует между содержанием кислорода, нитратным и аммонийным азотом сохраняется, изменения колеблются в пределах 5 %.

Корреляционная связь между фосфатами и БПК выше на 20 %.

Определение характеристических уравнений анализируемых параметров глубоководного сброса сточных вод г.Ялты.

Наиболее ярко выражены корреляционные связи концентрации фосфатов, содержания растворенного кислорода и АПАВ от прочих показателе (рис. 1). Эти зависимости наблюдаются во всех точках отбора: «Выпуск – 6», км «Восточнее выпуска на 250 м», «Западнее выпуска на 250 м», «Мористее выпуска на 250 м», «2-ой км по трассе выпуска».

Как следует из приведенных зависимостей, при увеличении концентрации фосфатов наблюдается уменьшение значений коэффициентов парной корреляции между показателями, которые характеризуют БПК, содержание нефтепродуктов и АПАВ.

Отмечается, что содержание азота и растворенного кислорода увеличивается пропорционально увеличению концентрации фосфатов.

Эти зависимости могут быть представлены следующими уравнениями (таблица 6):

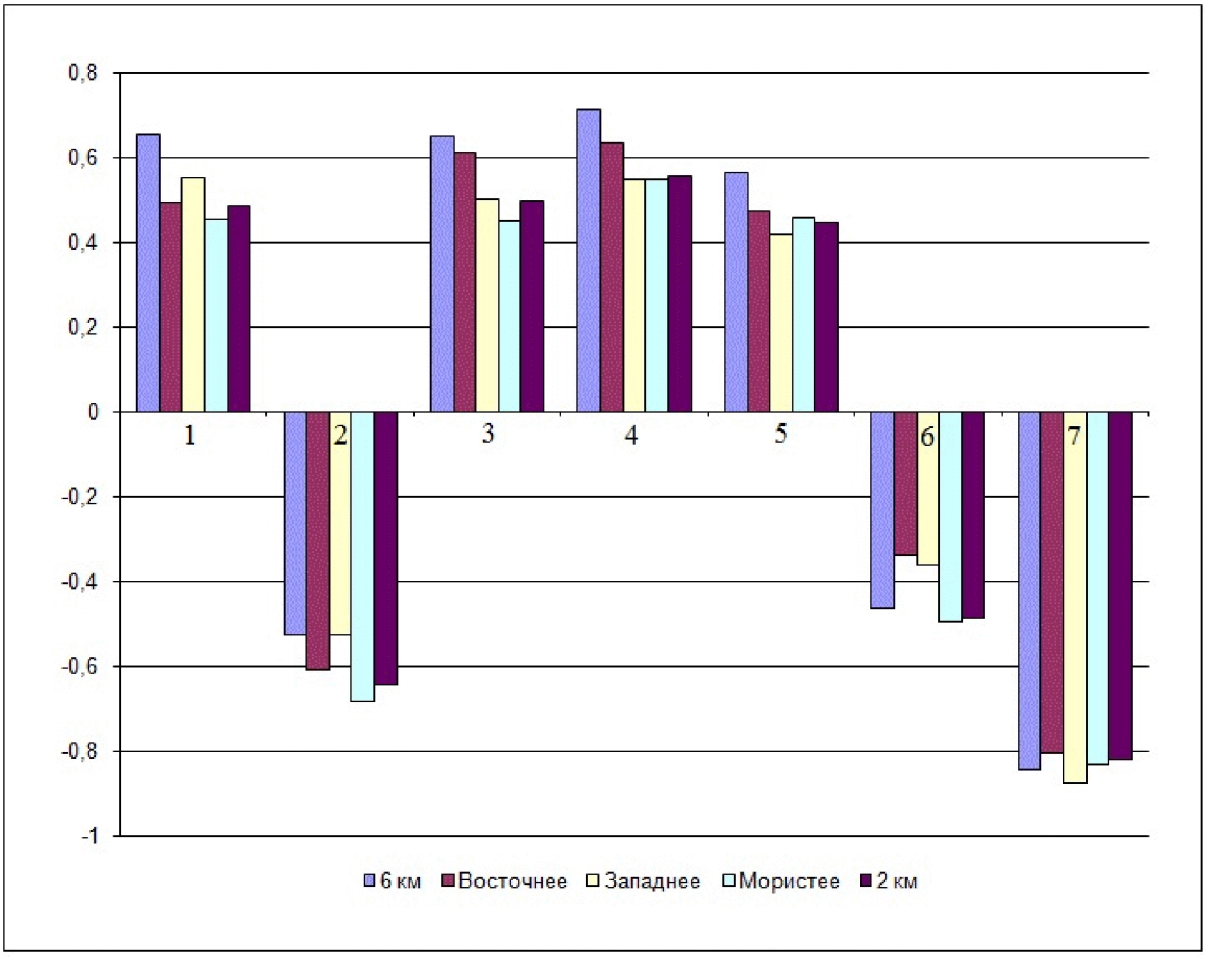


Рис. 1. Корреляционная зависимость концентрации фосфатов и показателей:
1 - концентрация растворенного кислорода, 2 - БПК, 3- концентрация азота аммонийного: 4 - концентрация азота нитритного, 5 - концентрация азот нитратного, 6 - содержание нефтепродуктов, 7 - АПАВ.

Таблица 6. *Характеристические уравнения взаимосвязи изменения содержания фосфатов и концентрации растворенного кислорода (1), БПК (2), концентрации азота аммонийного (3), концентрации азота нитритного (4), концентрации азот нитратного (5), содержания нефтепродуктов (6), АПАВ (7).*

№	Уравнение	R^2
1	$y_1 = 0,03x^4 - 0,33x^3 + 1,44x^2 - 2,54x + 2,06$	1
2	$y_2 = 0,04x^4 - 0,43x^3 + 1,75x^2 - 2,88x + 0,99$	0,99
3	$y_3 = -0,004x^4 + 0,07x^3 - 0,33x^2 + 0,55x + 0,37$	1
4	$y_4 = -0,007x^4 + 0,09x^3 - 0,35x^2 + 0,47x + 0,51$	1
5	$y_5 = -0,009x^4 + 0,10x^3 - 0,37x^2 + 0,43x + 0,40$	1
6	$y_6 = 0,009x^4 - 0,08x^3 + 0,18x^2 + 0,003x - 0,58$	1
7	$y_7 = -0,02x^4 + 0,19x^3 - 0,79x^2 + 1,34x - 1,56$	1

Полученные зависимости достоверны, т.к. величина R^2 близка к 1.

Анализ параметров уравнений позволяет сделать вывод о достаточно тесной связи между содержанием фосфатов и концентрацией растворенного кислорода (1), БПК (2) и АПАВ (7).

На рис. 2 приведена зависимость взаимосвязи концентрации растворенного кислорода с анализируемыми показателями в различных точках отбора проб.

Как и концентрация фосфатов, так и содержание кислорода прямо коррелируются с азотосодержащими соединениями.

Другие показатели (БПК, содержание нефтепродуктов, АПАВ) при росте концентрации растворенного кислорода уменьшаются.

Уравнения, характеризующие эти зависимости приведены в таблице 7.

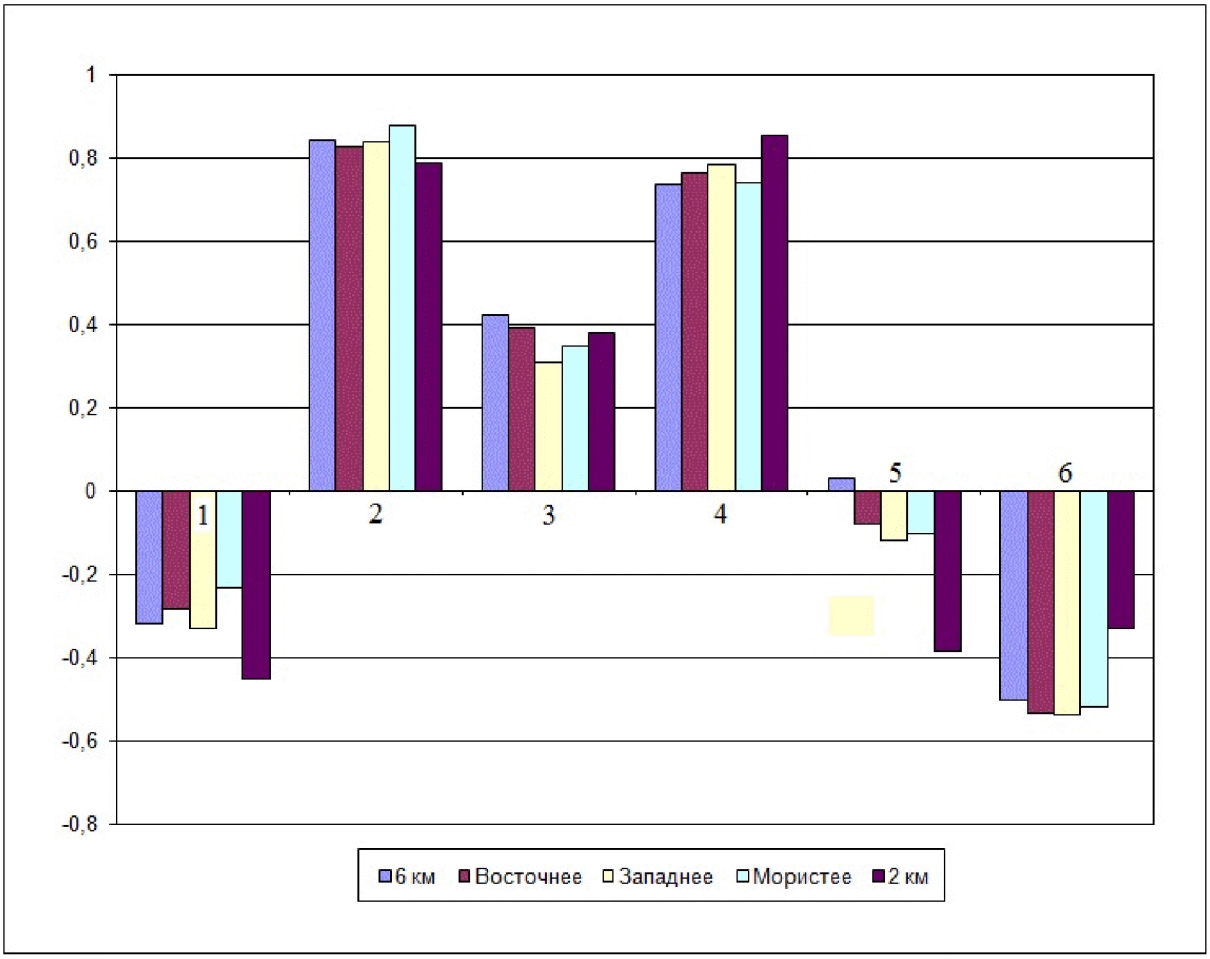


Рис. 2. Корреляционная зависимость содержания растворенного кислорода и показателей: 1 - БПК, 2- концентрация азота аммонийного: 3 - концентрация азота нитритного, 4 - концентрация азот нитратного, 5 - содержание нефтепродуктов, 6 - АПАВ.

Таблица 7. *Характеристические уравнения взаимосвязи изменения содержания растворенного кислорода и БПК (1), концентрации азота аммонийного (2), концентрации азота нитритного (3), концентрации азот нитратного (4), содержания нефтепродуктов (5), АПАВ (6).*

№	Уравнение	R^2
1	$y_1 = -0{,}03x^4 + 0{,}32x^3 - 1{,}26x^2 + 1{,}99x - 1{,}33$	1
2	$y_2 = -0{,}007x^4 + 0{,}07x^3 - 0{,}22x^2 + 0{,}27x + 0{,}73$	1
3	$y_3 = -0{,}01x^4 + 0{,}16x^3 - 0{,}65x^2 + 0{,}99x - 0{,}07$	1
4	$y_4 = 0{,}01x^4 - 0{,}12x^3 + 0{,}43x^2 - 0{,}60x + 1{,}02$	1
5	$y5 = -0{,}01x^4 + 0{,}14x^3 - 0{,}45x^2 + 0{,}47x - 0{,}11$	1
6	$y_6 = 0{,}006x^4 - 0{,}06x^3 + 0{,}23x^2 - 0{,}39x - 0{,}29$	1

Линейная зависимость наиболее четко выражена между концентрацией растворенного кислорода и БПК (1), концентрацией азотсодержащих соединений (3,4).

Наибольшее количество взаимосвязей выявлено между АПАВ и показателями среды (рис. 3).

Следует отметить, что корреляционные связи АПАВ носят в основном обратный характер. Прямые зависимости наблюдаются с pH, концентрацией кислорода и содержанием нефтепродуктов. Количественные зависимости приведены в таблице 8.

Уравнения (1, 2, 3, 6) позволяют сделать вывод о линейной зависимости между изменением АПАВ и pH, содержанием взвешенных частиц, концентрацией фосфатов и азота аммонийного.

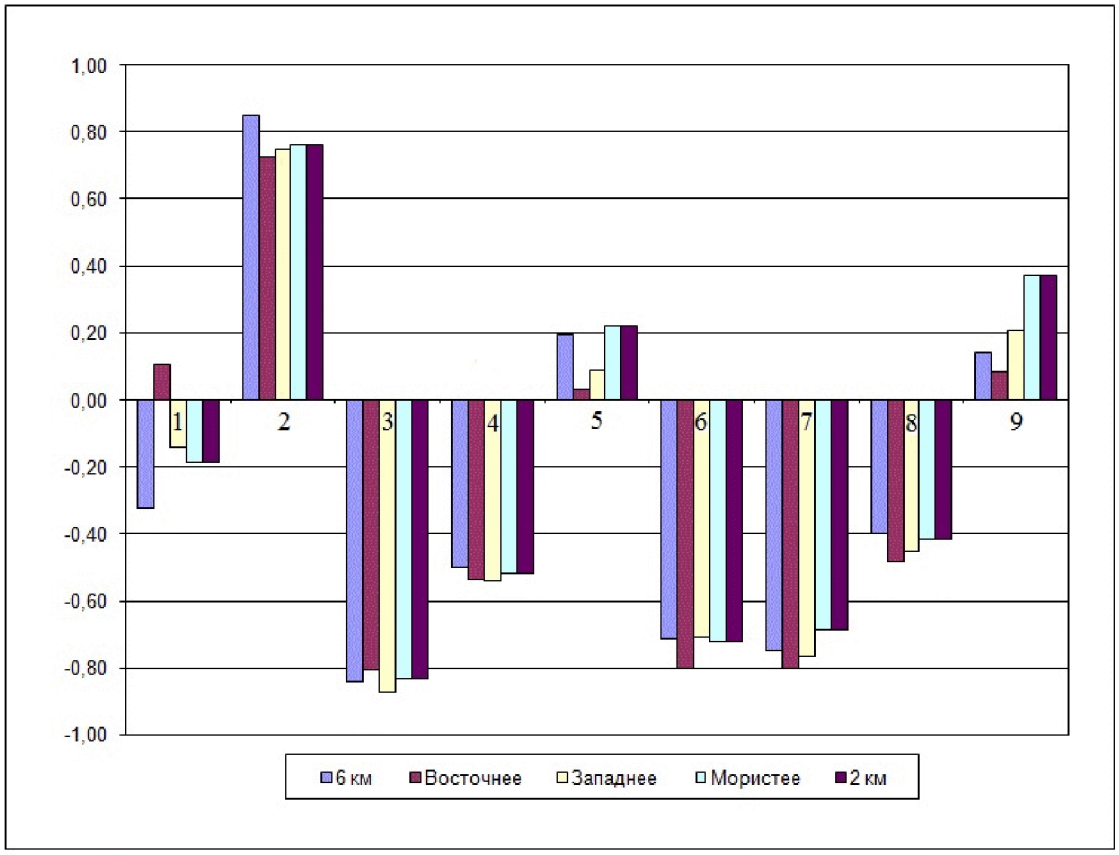


Рис. 3. Корреляционная зависимость АПАВ и показателей: 1 - реакция среды (pH), 2 - содержание взвешенных веществ, 3 - концентрация фосфатов, 4 - концентрация растворенного кислорода, 5 - БПК, 6 - концентрация азота аммонийного, 7 - концентрация азота нитритного, 8 - концентрация азот нитратного, 9 - содержание нефтепродуктов.

Таблица 8. *Характеристические уравнения взаимосвязи АПАВ и pH (1), содержанием взвешенных веществ (2), концентрацией фосфатов (3), концентрацией растворенного кислорода (4), БПК (5), концентрации азота аммонийного (6), концентрации азота нитритного (7), концентрации азот нитратного (7), содержания нефтепродуктов (9).*

№	Уравнение	R^2
1	$y_1 = = -0{,}04x^4 + 0{,}58x^3 - 2{,}75x^2 + 5{,}25x - 3{,}36$	1
2	$y_2 = 0{,}006x^4 - 0{,}087x^3 + 0{,}44x^2 - 0{,}93x + 1{,}42$	1
3	$y_3 = = -0{,}02x^4 + 0{,}19x^3 - 0{,}81x^2 + 1{,}36x - 1{,}57$	1
4	$y_4 = = -0{,}002x^4 + 0{,}02x^3 - 0{,}04x^2 + 0{,}002x - 0{,}48$	1
5	$y5 = = -0{,}002x^4 - 0{,}01x^3 + 0{,}22x^2 - 0{,}72x + 0{,}72$	1
6	$y_6 = = 0{,}02x^4 - 0{,}21x^3 + 0{,}94x^2 - 1{,}69x + 0{,}23$	1
7	$y7 = -0{,}003x^4 + 0{,}026x^3 + 0{,}008x^2 - 0{,}16x - 0{,}61$	1
8	$y8 = 0{,}003x^4 - 0{,}049x^3 + 0{,}28x^2 - 0{,}62x - 0{,}007$	1
9	$y9 = -0{,}003x^4 + 0{,}005x^3 + 0{,}13x^2 - 0{,}44x + 0{,}45$	1

Выводы

В ходе проведенных исследований были проанализированы данные по анализу глубоководного сброс после очистных систем г. Ялты. Анализ проводился по 5 точкам отбора: «Выпуск – 6», км «Восточнее выпуска на 250 м», «Западнее выпуска на 250 м», «Мористее выпуска на 250 м», «2-ой км по трассе выпуска» за 11 лет. Расчетный анализ проводился по следующим показателям: pH; содержание взвешенных веществ; концентрации фосфатов, растворенного кислорода, азота аммонийного, азота нитритного, азота нитратного; содержание нефтепродуктов; БПК; АПАВ.

В ходе проведения корреляционного анализа выявлены тесные и значительные корреляционные связи между содержанием фосфатов, растворенным кислородом и АПАВ с другими характеристиками среды.

Во всех точках отбора устойчиво наблюдается тесная обратная линейная корреляционная связь между АПАВ и содержанием фосфатов, аммонийным и нитратным азотом. Между АПАВ и содержанием взвешенных веществ - связь прямая.

Характеристические уравнения полиномиального вида приведены в таблицах 6 - 7. Максимальное значение парного коэффициента корреляции между содержанием взвешенный частиц и АПАВ в точке «Выпуск 6 км», минимальное - «Восточнее выпуска на 250 м».

Очень тесная прямая корреляционная связь отмечается во всех точках отбора между содержанием растворенного кислорода и аммонийным и нитратным азотом. Причем, в точке отбора «2-ой км по трассе выпуска» значение тесноты связи выше (на 10 %) с нитратным азотом по сравнению с аммонийным, в других точках - наоборот. В этой же точке отбора наблюдается значительная прямая корреляционная связь между АПАВ и нефтепродуктами.

Список литературы

1. Кутковский К. А. Виды сточных вод и основные методы анализа загрязнителей // Молодой ученый. — 2013. — №9. — С. 119-122. — URL https://moluch.ru/archive/56/7745/ (дата обращения: 05.04.2018).
2. Положение о Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденное постановлением Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 г. N 401. "Основные правила учета и контроля снижения активности радиоактивных растворов" (НП-067-11). mos.gosnadzor.ru
3. Ковригина Н.П. - Влияние глубоководного выпуска хозяйсгвенно-бытовых сточных вод на гидрохимические условия Ялтинского залива и прилегающих акваторий. Автореферат диссертации.http://earthpapers.net/vliyanie-glubokovodnogo-vypuska-hozyaystvenno-bytovyh-stochnyh-vod-na-gidrohimicheskie-usloviya-yaltinskogo-zaliva-i-pril#ixzz5BmPuUcrR
4. Барабанщиков Д. А., Сердюкова А. Ф. Особенности экологии Черного моря // Молодой ученый. — 2017. — №25. — С. 98-101. —
5. URL https://moluch.ru/archive/159/44713/ (дата обращения: 05.04.2018).
6. Федорова С.А., Безбородова Д.И. Исследование влияния ионов меди, никеля, кальция, магния и рн на определение железа (III) в питьевой воде. /Энергетические установки и технологии. - Севастополь - 2016. Т. 2. № 2. С. 78-82.
7. Федорова С.А., Бизюкина Д.С. Использование полного факторного эксперимента для определения влияния некоторых факторов на содержание железа во втором контуре АЭС.//Тез. IX Межвуз. науч.-тех.конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные вопросы ядерно-топливного цикла. ЯТЦ-2015». Севастополь: СевГУ, 2015.-20 с.
8. Федорова С.А., Стрюк А.Н. Химический контроль промышленных объектов на территории Донецкой области. // Всеукр. конф. «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности»/ тез. докл., Севастополь, 23 мая 2014 г. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2014. – С. 79

References

1. Kutkovskii K. A. Types of sewage and basic methods for the analysis of pollutants / / Young scientist. - 2013. - No. 9. - pp. 119-122. - URL https://moluch.ru/archive/56/7745/ (reference date: 05/04/2018).
2. Regulations on the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision approved by the Resolution of the Government of the Russian Federation of July 30, 2004 No. 401. "Basic Rules for Accounting and Control of Decreased Activity of Radioactive Solutions" (NP- 067-11). mos.gosnadzor.ru
3. Kovrigina N.P. - Influence of deep-water production of domestic wastewater on the hydro-chemical conditions of the Yalta Bay and adjoining water areas. Abstract of the dissertation-tion.http: //earthpapers.net/vliyanie-glubokovodnogo-vypuska-hozyaystvenno-bytovyh-stochnyh-vod-na-gidrohimicheskie-usloviya-yaltinskogo-zaliva-i-pril#ixzz5BmPuUcrR
4. Barabanschikov D.A., Serdyukova A.F., Especially the ecology of the Black Sea // Young Scientist. - 2017. - № 25. - P. 98-101. -
5. URL https://moluch.ru/archive/159/44713/ (date of circulation: 05/04/2018).
6. Fedorova S.A., Bezborodova D.I. Investigation of the effect of ions of copper, nickel, calcium, magnesium and pH on the determination of iron (III) in drinking water./ Power plants and technologies. - Sevastopol-2016. T. 2. № 2. P. 78-82.
7. Fedorova S.A., Bizyukina D.S. Use of a full factorial experiment to determine the influence of certain factors on the iron content in the second circuit of a nuclear power plant. // IX Inter-University. scientific-technical conference students, graduate students and young scientists "Topical issues of the nuclear fuel cycle. NFC-2015 ". Sevastopol: SevGU, 2015.-20 p.
8. Fedorova S.A., Stryuk A.N. Chemical control of industrial facilities in the Donetsk region. // All-Ukr. Conf. "Topical issues of nuclear-chemical technologies and environmental safety" / thesis. , Sevastopol, May 23, 2014 - Sevastopol: SNUAEiP, 2014. - P. 79.

УДК – 620.92

К вопросу перспектив энергетики и анализ некоторых экологических проблем

М. А. Фролова[1], П. А. Пономаренко[2], Н. Н. Ленивенко[3], И. Г. Тананаев[4], В. А. Собина[5]

ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]frolova-85@mail.ru

Статья поступила 12.04.2018 г.; после доработки 17.04.2018 г.

Аннотация

Статья посвящена анализу энергетических проблем, возникших как в связи с интенсивным давлением производства энергетики на окружающую среду, так и в связи с конечным объемом ресурсов. В статье дается сравнительный анализ различных способов получения энергии и доказывается, что альтернативы ядерной энергетики на настоящий момент нет.

Ключевые слова: энергетика, окружающая среда, топливо, анализ, ядерные реакции, термоядерные реакции

On the issue of energy prospects and analysis of some environmental problems

M. A. Frolova[1], P. A. Ponomarenko[2], N. N. Lenivenko[3], I. G. Tananaev[4], V. A. Sobina[5]

[1,2,3,4,5]*FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, [1]frolova-85@mail.ru*

Received 12.04.2018 y.; received in final form 17.04.2018 y.

Abstract

The article is devoted to the analysis of energy problems that have arisen both in connection with the intensive pressure of energy production on the environment and in connection with the final volume of resources. The article provides a comparative analysis of various methods of obtaining energy and proves that there is no alternative to nuclear power at the moment.

Keywords: energy, environment, fuel, analysis, nuclear reactions, thermonuclear reactions

Введение

Энергетика является основным фактором развития экономики в целом. Практически все стороны жизни современного промышленного общества опираются на производимую энергию в разных её формах.

От производимой энергии и энергоносителей полностью зависит современный транспорт, современная промышленность, добыча полезных ископаемых, быт и производство сельскохозяйственной продукции.

Вся история человечества связана с потреблением и, следовательно, ростом производства энергии на душу населения. Валовый национальный продукт для одного человека каждой страны прямо пропорционален количеству энергии, потребляемой в стране на душу населения.

Количество производимой энергии различных видов на человека, во всех странах различно. Вот почему есть развитые страны, в которых на душу производится $(2{,}5 \div 3{,}8) \cdot 10^8$ кДж/год энергии в год.

И есть страны, где эта цифра составляет менее $6 \cdot 10^7$ кДж/год энергии. Это слаборазви-

тые страны. В этих странах и низкий уровень жизни. [1]

Масштабы потребления

В настоящее время население Земли составляет $7{,}5 \cdot 10^9$ человек. Меньше половины населения живёт в развитых странах, но во всех странах стремятся повышать уровень жизни. Следовательно, есть стремление к тому, чтобы на каждого из $7{,}5 \cdot 10^9$ человек потребление энергии было близко хотя бы к нынешнему пределу развитых стран $2{,}5 \cdot 10^8$ кДж/год. Тогда будет необходимо вырабатывать и потреблять в год

$$E/\text{год} = 7{,}5 \cdot 10^9 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{11}\ \text{Дж/год} =$$
$$= 1{,}90 \cdot 10^{21}\ \text{Дж/год} = 1{,}5\ Q\ \text{Дж/год},$$

где $Q = 10^{21}$ Дж (общепринятая единица энергии).

В настоящее время в мире годовая выработка энергии, а, следовательно и её потребление, составляют 0,8 Q. В 1986-м году эта цифра составляла 0,3 Q. Т. о. наблюдается постоянный рост производства и потребления энергии в мире на душу населения.

Но, в принципе, и количество людей на земле тоже растёт. Значит, для того, чтобы все люди земли жили так, как в настоящее время в развитых странах, необходимо в год вырабатывать и потреблять примерно 3 ÷ 5 Q и даже больше. [4]

Источники энергии на Земле

Основными энергоносителями в настоящее время во всех странах, кроме Франции, Бельгии, Украины и некоторых других, являются, уголь, нефть и газ, запасы которых на Земле относится к невосполнимым. В настоящее время эти запасы на Земле по оценкам оптимистов оцениваются:

- уголь – 500 Q,
- нефти – 75 Q,
- газ – 30 Q. [4]

Даже при потребление в год 1 Q мировые запасы основных органических энергоносителей весьма скромные и не так долго можно ожидать момент, когда они иссякнут.

Солнце, как основной энергоносители на Земле, посылают в год на землю 2000 Q. Отражения в космическое пространство 740 Q. Годовые поступления энергии от других возобновляемых источников выглядит примерно так: тепловая энергия океана – 2 Q, геотермальная энергия земли – 1 Q, гидроэнергии – 0,2 Q, фотосинтез – 0,1 Q, приливы–отливы – 0,02 Q, ветер – 0,04 Q. [4]

Следовательно, даже сейчас человечество не может полностью решить проблемы потребление энергии(0,8 Q) за счёт таких энергоносители как ветер, приливы и отливы и гидроэнергетика.

Т.о. внимание человечество должно обращаться на техническое решение задач по использованию солнечной энергии.

Солнечная энергия

Среднее удельные количество солнечной энергии, приходится на 1 м^2 поверхности Земли за год составляет $4{,}85 \cdot 10^9$ Дж/м^2, что соответствует удельной мощности ≈155 Вт/м^2. В настоящее время существует два способа превращения солнечной энергии в электрическую: с использованием паросилового цикла и зеркальных отражателей и прямого преобразования солнечной энергии в электрическую с использованием полупроводниковых преобразователей. Опыт использования первого способа показал, что КПД преобразования достигает 25%, а для зеркальных отражателей необходима значительная площадь поверхности земли. КПД второго способа упирается в проблему изготовления полупроводниковых преобразователей: кремниевые преобразователи имеет КПД 30 ÷ 35 %, но быстро стареют, снижая выработку электрической энергии. Перспективны преобразователи из арсенида галлия. В лабораторных исследований их КПД составляет 33 ÷ 38 %.

Однако полевые испытания в США и Япония таких преобразователи показали их КПД, соответственно 21 % и 19 %. Нобелевский лауреат в области производства полупроводников академик Ж.И. Алфёров утверждает, что в качестве преобразователей солнечной энергии в электрическую могут служить гетерогенные структуры алюминий-галлий-мышьяк, КПД которых не ниже 45 %.

И даже в этом случае под солнечные электростанции потребуется отвести огромные площади поверхности Земли (для производства 1 Q необходимо примерно 1012 м^2, учитывая то что суша составляет вместе с Гренландией, Антарктидой и горными массивами всего ≈1014 м^2 [5], которые так необходимы под посевные площади, чтобы обеспечить продуктами питания $7{,}5 \cdot 10^9$ человек. Встречаются данные, которые говорят о том, что, если $7{,}5 \cdot 10^9$ человек обеспечить рационом среднего британцам, не

помешал бы ещё один такой же Земной шар посевных площадей.

С целью сохранения посевной площади внедряется идея выноса таких солнечных электростанций в космос с целью перехвата солнечной энергии, идущие на земную поверхность. В этом случае возникает две глобальные проблемы: передача огромного количества энергии с орбиты на Землю (экологическая и техническая стороны вопроса), и чисто экологическая: при перехвате солнечной энергии на орбите каждый квадратный метр поверхности земли не получит 155 Вт/м^2 энергии Солнца, а это значит, что южный берег Крыма превратится в южный берег Кольского полуострова, Гольфстрим ослабнет, похолодает в Европе и т.д. Т. о. человечество стоит перед серьёзнейшей проблемой надёжного энергообеспечение в недалёком будущем. Рассмотрим энергозапасы на Земле ядерных и термоядерных энергоносителей.

Ядерные и термоядерные запасы Земли

Запасы урана в Земной коре оценивается в $3\cdot10^{14}$ % от массы Земной коры (mз.к. = $9{,}83\cdot10^{19}$ т), т.е. в $3\cdot10^{14}$ т.

Запасы тория составляют $8\cdot10^{-4}$% mз.к., что равно $7{,}86\cdot10^{14}$ т. [4] Разведанные запасы урана по основным странам и континентам выглядит примерно так [7]:

- Африка – 900 000 т;
- Австралия – 735 000 т;
- Казахстан – 530 480 т;
- США – 345 000 т;
- Канада – 333 835 т;
- Россия – 150 000 т;
- Бразилия – 90 000 т;
- Узбекистан – 80 000 т;
- Украина – 70 000 т;
- Монголия – 50 000 т;
- Индия – 45 000 т;
- Китай – 40 000 т;
- Мировой океан – 2,3·1011 т. [8]

Если использовать уран только в реакторах на тепловых нейтронах (типа: ВВЭР, PWR, BWR) энергетические запасы разведанного урана на Земле оценивается примерно в $2\cdot10^5$ Q. Это уже решение энергетической проблемы на ближайшие $10^4 \div 10^5$ лет.

Если же использовать запасы урана Земли и тория в реакторах на быстрых нейтронах (типа Fenix, БН-600, БН-800 и др.), энергетические запасы урана оценивается в $5\cdot10^9$ Q, тория в $3\cdot10^{10}$ Q. [4]

Запасы термоядерного топлива Земли (дейтерий и лития) примерно составляют 10^{11} Q. [4]

Аспекты ядерной энергетики

Т. о. человечеству решить проблему надёжного энергетического обеспечения без использования ядерной энергии на тысячелетия вперёд не представляется возможным.

Но ядерная энергетика генерирует значительное количество радиоактивных веществ в основном в виде осколков деления ядерного топлива.

Например, один реактор типа ВВЭР-1000 за год работы на полной мощности накапливает $3\cdot10^{19}$ Бк осколков деления. [9] А для обеспечения энергии в 1 Q (настоящее время человечество вырабатывает 0,8 Q) необходимо работа 10^4 ВРЭР-1000. За год работы эти ВВЭР-1000 могут генерировать $3\cdot10^{23}$ Бк активности продуктов деления. Но эти продукты деления находится в топливной границы ядерного топлива (I барьер на пути распространения осколков деления), в оболочки ТВЭЛ из циркония или нержавеющей стали (II барьер) и в хранилище отработанного ядерного топлива, за пределы которого исключён выход радионуклидов в любом агрегатном состоянии (III барьер).

Активность самых распространённых радионуклидов

Проанализируем, велика ли активность в $3\cdot10^{23}$ или не очень. Сравним эту активность с активностью ряда природных радионуклидов, находящихся в Земной коре. Например: в земной коре находится 2,6 % от массы земной коры химического элемента К и $3{,}1\cdot10^{-2}$% химического элемента рубидия.

В их составе естественно, находится радионуклид $^{40}_{19}$K (0,012 % m_K) $^{87}_{37}$Rb (28 % m_{Rb}) с периодами полураспада $1{,}25\cdot10^9$ лет и $6\cdot10^{10}$ лет. [3] Общая активность $^{40}_{19}$K в Земной коре составляет $8{,}27\cdot10^{25}$ Бк и $^{87}_{37}$Rb – $1{,}9\cdot10^{25}$ Бк, что в сумме превышает годовую генерацию продуктов деления при производстве энергии в 1 Q за счёт реакторов ВВЭР-1000 в 1000 раз.

Надо учесть, что активность К-40 и Rb-87 рассредоточена в земной коре. Однако К является одним из основных элементов удобрений для выращивания всех сельскохозяйственных культур (K,P и N). Кроме этого, калий входит в состав рыбы, морепродукты, мясо животных, плодов, корнеплодов овощей, злаков и т. д.

Больше того, калий и рубидий входят состав тела стандартного человека (рост 170 см и масса 70 кг) в количестве 140 ÷ 150 г и 1,2 ÷ 1,5 г соответственно. Радионуклид К-40 в этом количестве составляет почти 0,02 г, а его относительная активность теле человека равна 5300 Бк, а рубидия ≈ 20 % от этого.

Активность К-40 и других природных радионуклидов в окружающей среде постоянно растёт из-за вскрытия земной коры для добычи полезных ископаемых и использование К, как одного из основных удобрений для выращивания сельскохозяйственных культур.

Так, например, в настоящее время удельная объемная активность воды в реках Днепра и Ингулец по сравнению с 1940 годом создаваемая К-40 выросла, соответственно, примерно в 5 и 30 раз. [2]. Вода морей и океанов только за счёт К-40 имеет объемную удельную активность 11 ÷ 18 Бк/л. [2].Среди радиоактивных осколков деления ядерного топлива наиболее долговечными являются Cs-137 и Sr-90, с периодами полураспада ≈ 30 лет и самым высоким удельным выходом на разделившееся ядро ядерного топлива ≈ 6 %. [10] Т. о. активность продуктов деления во времени будет определяться в основном именно этими радионуклидами. Активность продуктов деления, образованных в разные периоды, которые отличаются по времени, к примеру 300 лет, будет отличаться примерно в 1000 раз.

Заключение

Сравнивая изложенное выше, высокой организации обращения с продуктами деление для выработки энергии 1 Q на АЭС с ВВЭР-1000 за год, последнее не может представлять значительной опасности для биосферы Земли. Вот почему в силу складывающихся обстоятельств и обеспечения человечества энергии в будущем альтернативы у атомной энергии нет. Но вместе с этим, атомная энергетика и в политическом плане требует от человечества быть крайне осторожным, решать все вопросы экономического, религиозного, партийного, национального и межгосударственного характера только мирным путём, т.е. требует исключения войн на Земном шаре, иначе продукты деления в большом количестве окажется в окружающей среде, что представляет для всего человечества серьёзнейшую опасность, после которой все мотивы, из-за которых разгорелся военный конфликт, уже будут никому не нужны при любых их решении.

Список литературы

1. Н.С. Бабаев и др. «Человек и окружающая среда», Энергоатомиздат, М, 1984.
2. Г.Д. Коваленко, В.С. Волошин изд-во «Рената», Мариуполь, 2009.
3. Д.И. Запутинский и др. «Справочник по токсикологии радиоактивных изотопов», издат мед. Литературы, М. 1962.
4. А.С. Кошерев, В.В. Харитонов «Термогидравлические расчёты и оптимизация ядерных энергоустановок» Ат. энергоиздат, М.1979.
5. В.Ф. Дерпгольц «Мир воды» изд. «Недра», Л.,1979.
6. Атомная энергия. Краткая энциклопедия. Госнаучиздат БСЭ М.1958.
7. И.М. Гудков и др. «Радиоэкология» изд. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев,2011.
8. В.Ф. Козлов «Справочник по радиационной безопасности» энергоатомиздат., М,1991.
9. Д.Л. Бродер и др. «Биологическая защита транспортных реакторных установок, Атомиздат., М.1969.
10. Г.Г. Бартоломей и др. «Основы теории и методы расчёта ядерных энергитических реакторов» Энергоатомиздат, М.1989.

References

1. N.S. Babaev i dr. «*Man and environment*», Energoatomizdat, M, 1984.
2. G.D. Kovalenko, V.S. Voloshin publishing house «*Renata*», Mariupol, 2009.
3. D.I. Zaputinskij i dr. «*Handbook of Toxicology of Radioactive Isotopes*», published medical Literature, M. 1962.
4. A.S. Kosherev, V.V. Haritonov «*Thermohydraulic calculations and optimization of nuclear power plants*» At. energoizdat, M.1979.
5. V.F. Derpgol'c «*The world of water*» publishing «*Bosom*», L., 1979.
6. *Atomic Energy.* Brief encyclopedia. Gosnauchizdat TSB M.1958.
7. I.M. Gudkov i dr. «*Radioecology*» publishing house National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine, Kyiv, 2011.
8. V.F. Kozlov «*Handbook of Radiation Safety*» energoatomizdat., M, 1991.
9. D.L. Broder i dr. «*Biological protection of transport reactors*», Atomizdat., M.1969.
10. G.G. Bartolomej i dr. «*Fundamentals of the theory and methods for calculating nuclear power reactors*» Energoatomizdat, M.1989.

УДК 543.544-414

Разработка перспективных комбинаций сорбционных смесей для очистки сточных вод от анионов

Н.И. Черкашина[1], А.О. Литвинова[2]
ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]Selyanskij-AS@yandex.ru , [2]oleksandra.litvinova@mail.ru
Статья поступила 28.04.2018 г.; после доработки 30.04.2018 г.

Аннотация

Предложено математическое описание процесса фильтрации, граничные условия, зависимость статической обменной емкости представлена в программе Delphi7 на примере системы СВО-5. Приведены теоретические и экспериментальные данные по конкурентной сорбции анионов Cl⁻ на коммерчески доступных ионообменных сорбентах на примере анионитов и катионитов.

Ключевые слова: математическое описание, фильтрация, граничные условия, ионообменные материалы, сорбция, обменная емкость, система СВО-5, насыпная масса сорбента.

The development of promising combinations of sorption of compounds for the treatment of waste waters from anions

N.I. Cherkashina[1], A.O. Litvinova[2]
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st,, Sevastopol, 299053, Russia.
[1]selyanskij-as@ya.ru, [2]*oleksandra.litvinova@mail.ru*

Received 28.04.2018 y.; received in final form 30.04.2018 y.

Abstract

The mathematical description of the filtering process, boundary conditions, the dependence of the static exchange capacity presented in the program Delphi7 case of a system of WTS-5. Theoretical and experimental data for competitive adsorption of anions Cl⁻, commercially available ion-exchange sorbents for example, the anion exchange resin and cation exchange resin.

Keywords: mathematical description, filtering, boundary conditions, ion exchange materials, dynamic exchange capacity, sorption, system, water cooling system SWC-5, bulk weight of the sorbent

Введение

Содержание примесей в сточных водах отличается: воды от охлаждения продуктов и аппаратуры практически не загрязнены, а воды от технологических процессов содержат загрязняющие вещества в больших количествах [1].

Для очистки сточных вод от соединений фосфора, мышьяка, цианистых соединений и ионов металлов (цинка, свинца, меди, хрома, никеля, кадмия, ванадия, марганца), а также и радиоактивных веществ применяют ионный обмен.

Этот процесс протекает на ионитах, представляющих собой твердые полиэлектролиты, у которых ионы одного знака заряда закреплены на твердой матрице, а ионы противоположного знака заряда способны переходить в раствор и заменяться на другие ионы того же знака.

Иониты состоят из полимеров, имеющих функциональные группы, которые способны диссоциировать в растворе.

В зависимости от того, какие ионы переходят в раствор, иониты разделяются на катиониты и аниониты.

Для очистки сточных вод, содержащих тяжелые металлы, основными физико-химическими методами считаются реагентные, мембранные,

электрохимические, биохимические и сорбционные методы [2].

Сорбционное извлечение металлов из сточных вод получило достаточно широкое распространение вследствие высокой эффективности и отсутствия вторичных загрязнений.

Сорбционные материалы поглощают из водных растворов металлы практически до любых остаточных концентраций [3-4]. Несмотря на разнообразие применяемых адсорбентов, многие из них не удовлетворяют всему комплексу требований, предъявляемых к материалам подобного типа, в связи с чем поиск и разработка новых сорбционных материалов ведется постоянно.

В данной работе рассматривались механические, ионообменные фильтры на примере системы СВО-5 [5].

Система СВО-5 состоит из двух основных и одной резервной ниток для двух блоков АЭС (но могут быть и другие варианты).

Производительность одной нитки составляет примерно 40…50 $м^3$/ч.

Каждая основная нитка состоит из механического, катионитового, анионитового фильтров, ловушки зернистых материалов, бака очищенной воды и насосов бака очищенной воды. Резервная нитка включает в себя механический, катионитовый, анионитовый фильтры и ловушку зернистых материалов.

Математическое описание процесса фильтрации, граничные условия, рассчитанный коэффициент фильтрации представлен в программе Delphi7 на примере системы СВО-5.

В данной работе был исследован ряд сорбционно-активных материалов:

1) аниониты - АВ-17-8, АВ-17П, Амберлит IRA-458, Вофатит SBW, Варион АТ-660, Дауэкс SBR-(P), Дауэкс MSA-1, Смола Purolite A–860, Тульсион А-72(МП);
2) КУ-2-8, КУ-23, Амберлит IR-120, Тульсион Т-42, Смола DOWEX HCR–S/S, Сорбент АС, АНКБ-35, «Фолиокс-КГО» сорбционные характеристики изучены [6-10].

Эти сорбенты можно использовать для очистки или доочистки сточных вод различных промышленных предприятий, обезвреживания газовых выбросов, ликвидации разливов нефти и других химических продуктов в настоящее время их производят в основном из углей различных марок, торфа и древесного угля.

В ряде стран разработаны методы получения более дешевых сорбентов из различных отходов, запасы которых ежегодно пополняются, а квалифицированное использование их не превышает 15…20 %.

Эти сорбенты отличают наличием химически активных групп, способны взаимодействовать с находящимися в растворе ионами металлов с образованием хелатных комплексов. Такие группы можно ввести в полимерную матрицу путем химических превращений.

Из литературных источников известно, что гранульные хелатообразующие сорбенты обладают высокой селективностью по отношению к ионам тяжелых металлов, хорошо сорбируют золото, осмий, иридий, рутений, платину из растворов [11-12].

Катионит КУ-2-8 – это сильнокислотный катионит гелиевой структуры, активная группа – сульфогруппа.

Размер зерен – 0,315…1,25 мм, полная статическая обменная емкость – 1,8 мг-моль/$см^3$, динамическая емкость – 526 г-моль/$м^3$. Регенерацию производят раствором HCl или H_2SO_4 .

Применяют для разделения и удаления цветных и редких металлов в гидрометаллургии, при очистке оборотных и сточных вод, для регенерации отходов гальванотехники и металлообработки и др.

Анионит АВ-17-8 – это сильноосновный анионит, активная группа – четвертичные триметиламмониевые группы.

Размер зерен – 0,315…1,25 мм. Применяется в гидрометаллургии, для очистки сточных и оборотных вод, в водоподготовке, химической промышленности и др.

Рассмотрена возможность сорбционного концентрирования ионов Cl (I), P(III), F(I) полиамфолитом АНКБ-35 в широком диапазоне pH равновесного раствора, концентраций металлов, скорости потока [13].

Для ионита Фолиокс-КГО установлен ряд селективности металлов при pH раствора 2…5.

Найдены оптимальные условия сорбции и десорбции ионов, показано влияние природы и концентрации кислоты на эффективность извлечения ионов тяжелых металлов из ионита Фолиокс-КГО (аминокарбоксильный).

Проведено сопоставление значений подвижности Cl^+, рассчитанных из удельной электропроводности и миграционного потока в ионообменных материалах различной природы – как промышленно выпускаемых органических, так и неорганических, на основе амфорного фосфата циркония [6-10].

Для большинства материалов подвижность составляет 1,0 - 1,5 10^{-11} $м^2В^{-1}с^{-1}$.

Указанные преимущества достигаются благодаря принципиально новому подходу к орга-

низации всего процесса и применению новых материалов.

Основной недостаток всех существующих методов – сложность утилизации осадков вследствие их многокомпонентности и переменного состава.

Эксплуатационные и экономические недостатки сорбционного метода очистки природных и сточных вод традиционными адсорбентами устраняются при использовании адсорбента, обладающего высокой поверхностной активностью зерен, позволяющего восстанавливать сорбционную способность посредством технологически несложной, непродолжительной по времени регенерации, проводимой непосредственно в фильтровальном сооружении наиболее эффективной основой для получения адсорбентов с целенаправленно регулируемыми свойствами могут служить алюмосиликатные минералы, так как в их структуру можно вводить практически любые добавки органического и минерального происхождения, которые будут придавать поверхности зерен требуемые свойства.

Цель данной работы – проверка математического моделирования системы, основанной на применении сорбентов, обладающих высокими избирательными и емкостными характеристиками по отношению к различным анионам, буферными свойствами, осмотической устойчивостью, способностью достаточно полно регенерироваться, и сменных фильтров, конструкция которых обеспечит высокую пропускную способность и простоту эксплуатации, а также создание замкнутой технологической схемы процесса регенерации сорбентов.

Эксперимент

Для приготовления всех растворов использовались реактивы качества не ниже ч.д.а. и бидистиллированная вода.

Необходимую для экспериментов величину pH получали добавлением азотной кислоты.

Перед проведением экспериментов все ионообменные материалы промывали раствором хлорида натрия (10 г/л), а затем бидистиллированной водой до нейтральной величины pH смыва.

Концентрация ионов хлора в рабочем растворе составляли: C_{Cl}=10 - 110 мг/л.

В диапазоне концентраций получены значения статической обменной емкости (СОЕ) для современных ионитов приведены на рис. 1.

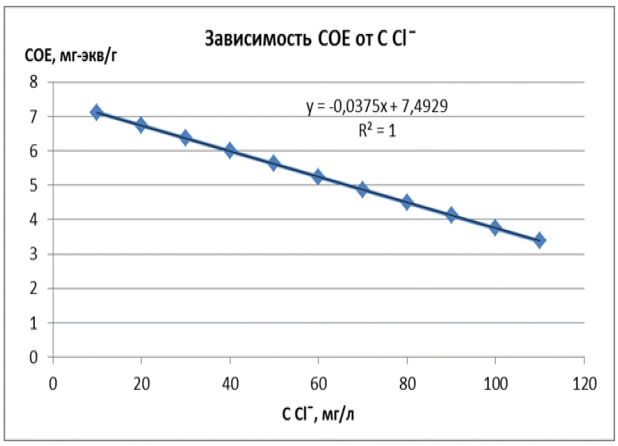


Рис.1. Зависимость СОЕ от концентрации ионов хлора.

Используя математическое описание процесса фильтрации представленное в программе Delphi7 можно выбрать оптимальные сорбционные материалы, их возможные комбинации для реализации различных задач при сорбционной очистке сточных вод.

В данной работе рассматривались механические, ионообменные фильтры на примере системы СВО-5.

Используются на первой стадии ионирования катионит в + H форме, а на второй стадии анионит в − OH форме, который обеспечивает высокую эффективность извлечения хлоридов на аниониты АВ-17-8.

Пример рабочего окон для получения экспериментальных точек представлен на рис. 2.

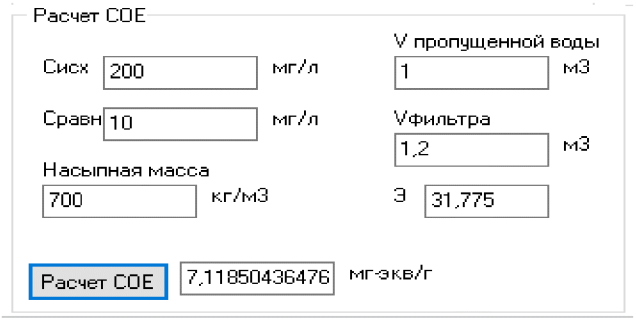


Рис. 2. Рабочее окно в программе Delphi7 для получения зависимости СОЕ от концентрации ионов хлора.

Таким способом возможно определить предельные значения для современных аналогов ионообменных материалов, результаты представлены в таблице. 1.

Из таблицы видны предельные значения СОЕ для анионов Cl и F в ряду анионообменных фильтров, насыпные массы брались из расчета применения в системе СВО-5.

Таблица 1. *Предельные значения для современных аналогов ионообменных материалов.*

Марка анионита	АВ-17-8	АВ-17П	Амберлит IRA-458	Вофатит SBW	Варион АТ-660	Дауэкс SBR-(P)	Дауэкс MSA-1	Смола Purolite A–860	Тульсион А-72(МП)
Насыпная масса, кг/м^3	700	850	720	700	740	650	680	715	690
COE_{Cl}, мг-экв/г	5,62	4,63	5,46	5,62	5,32	6,05	5,78	5,5	5,7
COE_F, мг-экв/г	5,26	4,37	5,79	4,56	3,62	5,56	6,89	6,5	7,2

В диапазоне концентраций для различной насыпной массы получены значения статической обменной емкости (СОЕ) для ионита Дауэкс MSA-1, который дал наибольший положительный результат представленный на рис. 3.

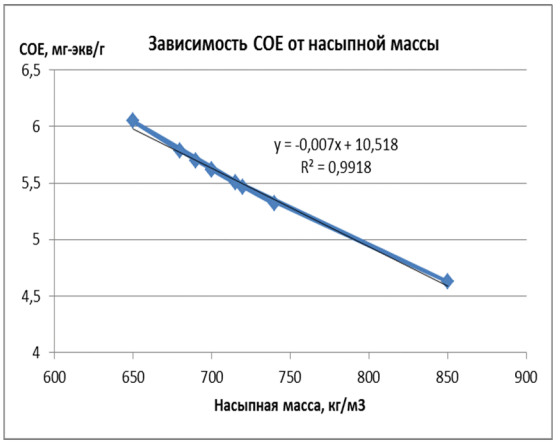


Рис.3. Зависимость СОЕ от насыпной массы фильтра.

Пример рабочего окон для получения экспериментальных точек представлен на рис. 4.

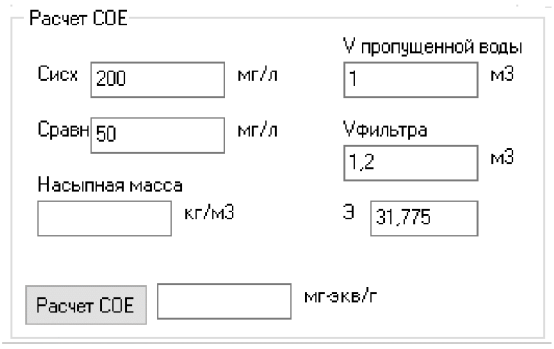


Рис. 4. Рабочее окно в программе Delphi7 для получения зависимости СОЕ от насыпной массы.

Показано, что в условиях, приближенных к условиям очистки сточных вод, в области максимальных концентраций, большей избирательностью к ионам фтора, обладают материалы: Тульсион А-72 (МП), Дауэкс MSA-1.

В области высоких концентраций, условно соответствующих концентрациям ионов хлора в сточных водах промышленных предприятий, максимальной конкурентной емкостью по ионам хлора обладали материалы:

– Дауэкс MSA-1,
– Варион АТ-660,
– Амберлит IRA-458,
– Смола Purolite A–860.

Увеличение масштабов применения природных сорбентов обусловлено тем, что при развитой удельной поверхности они обладают хорошими сорбирующими свойствами и в десятки раз дешевле синтетических. В связи с этим упрощается их технологическое применение, часто исключается стадия регенерации.

В процессе исследований было установлено, что использование смеси (табл. 1-2) ионитов способствует повышению эффективности сорбционной очистки растворов от ионов, причем оптимальные состав и степень протонирования смеси определяются как типом, так и формой присутствия металла в растворе, а также и кислотностью последнего.

Особого внимания заслуживает факт высокого сродства смеси, содержащей 75 % катионита и 25 % анионита.

При использовании смеси наблюдается повышение емкости индивидуальных ионитов по отношению к ионам фтора и хлора, которое объясняется созданием условий для максимальной реализации их емкостных свойств.

К существенным достоинствам применения смеси ионитов следует отнести также стабилизацию кислотности обрабатываемой воды на уровне pH 7…7,5 и незначительное изменение удельного объема (не более 7 %) при регенерации и переводе в рабочую форму.

Выводы

1. Для выбранных ионообменных материалов экспериментально получены значения не-

которых ионообменных характеристик высоких концентраций ионов фтора и хлора. Полученные данные использованы при разработке перспективных комбинаций сорбционных смесей для системы СВО-5.

2. Найдены зависимости статической обменной емкости в диапазоне концентраций для исследуемых ионитов.

Список литературы

1. Скороходов В.Ф., Месяц С.П., Остапенко С.П. Решение проблемы очистки сточных вод промышленных предприятий от многокомпонентных загрязнений // Горный журнал. – 2010. – № 9. – С. 106–108.
2. Алыков Н.М., Павлова А.В., Нгуэн Кхань Зуй. Сорбционное удаление из воды ионов тяжелых металлов // Безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 4. – С. 17–20.
3. Солуковцева Т.В., Лысенко А.В. Разработка способа очистки сточных вод от ионов меди отходами свеклосахарного производства //Сборник научных трудов 4-й Международной молодежной научной конференции. В 2-х томах. Ответственный редактор А.А. Горохов. 2017. С. 68-71.
4. Дремичева Е.С., Лаптев А.Г. Моделирование сорбционного метода очистки сточных вод от нефтепродуктов и тяжелых металлов // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2017. Т. 6. С. 81-85.
5. Сукрушев А.В., Браславский Ю.В. Водный режим контуров АЭС: учеб. пособие. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2013. – 220 с.
6. 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.
7. Черкашина Н.И. Исследование эффективных сорбционных материалов для извлечения радионуклидов из технологических сред / Н.И. Черкашина, О.В. Ведищева // Материалам научно-практической конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности» (15 – 18 июня 2016 г., г. Севастополь). – Севастополь: СевГУ , 2016. – 356 с.
8. Черкашина Н.И. Технология получения сорбционных материалов на основе лигнина для утилизации жидких радиоактивных отходов / Н.И. Черкашина // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук – Севастополь: изд-во СНУЯЭиП, 2011. – С. 22.
9. Черкашина Н.И. Использование сорбентов на основе отходов переработки растительного сырья при очистке сточных вод и технологических сред / В.А. Ерофеев, Е.А. Культенко, Н.И. Черкашина // Экологическая безопасность.- 2013. - № 2 (16). - С. 89-92.
10. Пат. 78908 Украины, МПК51 B 01 J 20/22 (2006.01). Технология производства сорбента на основе лигнина (патент на изобретение) / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофееф.; заявитель и патентообла- датель Севастопольский нац. ун–т ядерной енергии и промыщленности. – № u 2012 09109; заявл. 10.04.2013; опубл. 12.07.13, Бюл. № 7. – 5 С.
11. Guixia Zhao, Xilin Wu, Xiaoli Tan, Xiangke Wang. Sorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions: A Review // The Open Colloid Science Journal. – 2011. – № 4. – P.19–31.
12. Долина Л.Ф. Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжелых металлов: Монография. – Дн-вск.: Континент, 2008. 254 с.
13. Подвижность Cu^{2+} в различных ионообменных материалах. Мальцева Т.В., Василюк С.Л. и др.//ХиТВ. – 2004, т. 26, №5, с. 450-457.

References

1. Skorokhodov V. F., Mesyats S. P., Ostapenko S. P. solution to the problem of wastewater treatment of industrial enterprises from multi-component of pollution // Mining journal.. – 2010. – № 9. – C. 106–108.
2. Alykov N. M. Pavlov, A. V., Nguyen Khanh Duy. Sorption removal of water from heavy metal ions // life Safety. – 2010. – No. 4. – P. 17-20.
3. Salakavala T. V., Lysenko A. V. Development of the method of sewage treatment from ions of the me-Dee waste of sugar beet production // Collection of scientific papers 4-th International youth scientific conference. In 2 volumes. Executive editor A. A. Gorokhov. 2017. P. 68-71.
4. Demicheva E. S., Laptev A. G. Modeling sorption method of purification of sewage from oil products and heavy metals // Mathematical methods in technics and technologies - mmtt. 2017. Vol. 6. P.81-85.
5. Sucrose A. V., Braslavsky J. V. Water circuits of nuclear power plants: proc. allowance. – Sevastopol: SNUEI, 2013. – 220 c.
6. Cherkashina N.I., Cherkashin A. S, Maronchuk I. I. Ochistka stochnix vod ot ionov metallov sorbentami iz prirodni[materialov na osnove lignina [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.
7. Cherkashina N.I., Vedischeva V.A. Issledovanie effectivnosti sorbcionnix materialov dlja izvlechenijz radionuclidov iz texnologicheskij sred [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.
8. Cherkashina N.I. Texnologija polychenijz sorbcionnix materialov na osnove lignina dlja ytilizacii jidkih radioaktivnix otxodov[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.
9. Cherkashina N.I., Erofeyev V.A, Kultenko E.A. ispolzovanie sorbentov na osnove othodov pererabotki rastitelnogo sirjz pri ochistke stochnix vod I tehnologicheskix sred [The use of sorbents based on waste processing of vegetable raw materials in the purification of wastewater and technological environments.] Environmental safety, 2013, the Issue Vol. 2(16) – Pp. 89-92.
10. 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. Metod proizvodstva modificirovannogo kostochkovogo sorbenta “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.
11. 11.Guixia Zhao, Xilin Wu, Xiaoli Tan, Xiangke Wang. Sorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions: A Review // The Open Colloid Science Journal. – 2011. – № 4. – P.19–31.
12. Dolina L. F. Modern equipment and technologies for wastewater treatment from salts of heavy metals. – Dnepropetrovsk .: The continent 2008. 254 p.
13. The mobility of Cu^{2+} in different ion-exchange materials. Maltseva T. V., Vasilyuk S. L., etc. //HandTV. – 2004, T. 26, №5, P. 450-457.

УДК 628.16:537.622

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОМБИНАЦИЙ СОРБЦИОННЫХ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ ИОНОВ СВИНЦА И МЕДИ ИЗ ЖИДКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

Н.И. Черкашина[1], А.О.Литвинова[2]

[1]*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Курчатова 7, г. Севастополь, 299015, Selyanskij-AS@yandex.ru*

[2]*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Курчатова 7, г. Севастополь, 299015, oleksandra.litvinova@mail.ru*

Статья поступила 11.04.2018 г.; после доработки 18.04.2018 г.

Аннотация

Предложено математическое описание процесса фильтрации, граничные условия, зависимость динамической обменной емкости представлена в программе Delphi7 на примере системы СВО-5. Приведены теоретические и экспериментальные данные по конкурентной сорбции катионов металлов Cu^{2+}, анионов Cl^-, на коммерчески доступных ионообменных сорбентах в форме гранул.

Ключевые слова: математическое описание, фильтрация, конкурентная сорбция, ионообменные материалы, ДОЕ, обменная емкость, система СВО-5, насыпная масса сорбента.

THE DETERMINATION OF OPTIMAL COMBINATIONS OF SORPTION FOR THE REMOVAL OF LEAD IONS AND COPPER FROM LIQUID PROCESS MEDIA

N.I. Cherkashina[1], A. O. Litvinova[2]

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st,, Sevastopol, 299053, Russia

[1]selyanskij-as@ya.ru

Received 11.04.2018 y.; received in final form 18.04.2018 y.

Abstract

The mathematical description of the filtering process, boundary conditions, the dependence of the dynamic exchange capacity presented in the program Delphi7 case of a system of SWC-5. For the selected ion-exchange materials isotherms of competitive binding are experimentally obtained, the parameters of sorption processes in limiting cases for low and high concentrations of heavy metal ions are determined. Dependences of dynamic and static exchange capacity for the studied ionites were found.

Keywords: mathematical description, filtration, competitive sorption, ion exchange materials, dynamic exchange capacity, sorption, system, water cooling system SWC-5, bulk weight of the sorbent.

Введение

В питьевой водоподготовке особенно важно обеспечить максимально возможную полноту извлечения высокотоксичных ионов тяжелых металлов [1]. При недостаточной очистке сточных вод ионы тяжелых металлов, попадая в водоемы и подземные горизонты, отрицательно влияют на обитающие в них организмы и растения, накапливаются в них. Вот почему проблема очистки промышленных стоков и подготовки воды для технических и хозяйственно-питьевых

целей с каждым годом приобретает все большие значение [2]. Промышленные сточные воды содержат целый ряд чрезвычайно токсичных примесей, но наиболее опасны для окружающей среды ионы тяжелых металлов –ртуть, свинец, кадмий, мышьяк, медь, ванадий, олово, цинк, сурьма, малибден, кобальт, никель и др.

Применение ионообменных смол позволяет обеспечить не только глубокую очистку сточных вод, но и возвратить в производство ценные продукты. Примером может служить ионообменная технология очистки сточных вод, которая используется на целом ряде предприятий машиностроения и металлообработки.

На основании результатов выполненного исследования разработана программа описания работы технологической схемы комплексной установки для кондиционирования сточных вод, имеющих в своем составе анионы и соли тяжелых металлов.

Основным материалом, использующимся в качестве сорбента в настоящее время, являются: катионит КУ-2-8 – это сильнокислотный катионит гелиевой структуры, активная группа – сульфогруппа, размер зерен – 0,315…1,25 мм, полная статическая обменная емкость – 1,8 мг-моль/см^3 , динамическая ем кость – 526 г-моль/м^3 (применяют для разделения и удаления цветных и редких металлов в гидрометаллургии, при очистке оборотных и сточных вод, для регенерации отходов гальванотехники и металлообработки и др.) [3]; анионит АВ-17-8 – это сильноосновный анионит, активная группа – чевертичные триметиламмониевые группы, размер зерен – 0,315…1,25 мм (применяется в гидрометаллургии, для очистки сточных и оборотных вод, в водоподготовке, химической промышленности и др.) [4].

В данной работе рассматривались механические, ионообменные фильтры на примере системы СВО-5 [5].

Каждая основная нитка состоит из механического, катионитового, анионитового фильтров, ловушки зернистых материалов, бака очищенной воды и насосов бака очищенной воды. Резервная нитка включает в себя механический, катионитовый, анионитовый фильтры и ловушку зернистых материалов.

Катионирование натрием применяется в большей степени в процессе извлечения ионов тяжелых металлов из однокомпостных растворов различного характера, чтобы обеспечить последующую утилизацию их соединений.

В очистке многокомпонентных сточных вод со слабой концентрацией применяют большей частью Н-катионирование. Экономичность и эффективность от извлечения указанных ионов ионным обменом, зависит от концентрации их в водостоках, значения pH, от общей минерализации воды, от наличия и сконцентрированности ионов железа и кальция. Показатель увеличения общей минерализации водостоков значительно снижает долю сульфокатионитов и в малой степени сказывается на содержании карбоксильных катионитов. Однако их можно применять только в очистке слабощелочных или нейтральных сточных вод.

Сущность способа заключается в том, что глубина сорбционного извлечения меди из проточных растворов определяется большим количеством факторов, как правило, достаточно легко и технологично регулируемых и важных для разработки научных представлений и технологической реализации процесса. К ним следует отнести, в частности, удельную массу сорбента по активному началу, характер и уровень его предварительной подготовки, включая, например, кислотную и термическую обработки, pH исходных растворов, линейную скорость потока, а также время до проскока сорбируемых ионов. Не меньшее значение имеет высота слоя сорбента.

Поскольку большинство ионитов представляют собой твердые тела, ионный обмен имеет сходство с адсорбцией, по этой причине иногда называют ионный обмен ионообменной сорбцией, а иониты – ионнобменными сорбентами [9].

Математическое описание процесса фильтрации, граничные условия, рассчитанный коэффициент фильтрации представлен в программе Delphi7 на примере системы СВО-5.

Для определения кинетических параметров сорбции на сорбентов использовали растворы, содержащие ионы Cu^{2+}, Pu^{2+}, температурные интервалы исследований коэффициента диффузии Д 25…45…60 °С.

Модельную полную статическую обменную емкость (ПСОЕ) ионитов определяли исходя из расчета общих гидроксилов по формуле [6-9]

$$\sum_{OH}^{COOH} = \frac{25H\left[Ba(OH_2) + 12{,}52H(HCl)aHBa(OH_2)\right]10C}{A\left[100 - (W+3)\right]}, \text{ мг} \cdot \text{экв/г}, \quad (1)$$

где а – количество мл $Ba(OH)_2$, пошедшее на обратное титрвоание; А – навеска ионита (сухого), г; W – влажность ионита, %; З – зольность сорбента, %.

С целью определения общего количества функциональных групп, определяющих модельную ПСОЕ, функциональный анализ проводили по методикам [10].Экспериментальная статическая обменная емкость (ПСОЕ) ионита (мг-экв/г) вычислялась на основании экспериментальных данных по формуле [9]

$$A = \frac{C_0 - C}{m} \cdot V, \qquad (2)$$

где C_0 и С – исходная и конечная концентрация в растворе моль/дм^3; V – объем раствора, дм^3; m – масса навески ионита, г.

Общий порядок расчета по уравнению состоит в следующем: каждая кинетическая кривая ионного обмена представляется набором их по методу равновесно-кинетического анализа точечные значения продолжительности процесса используются непосредственно, а текущая концентрация С пересчитывается ($z-z_0$) по выражениям:

$$Z - z_0 = nt; \qquad (3)$$

$$z_0 = \ln A. \qquad (4)$$

В этом случае необходимо ввести количественный учет случайных и регулярных отклонений в экспериментальных данных, в особенности это относится к нарушениям изотермичности или нестационарности режима перемешиваемости в начальной стадии процесса.

Модельная формально-кинетическая продолжительность процесса t будет складываться из фактической (экспериментальной) t_0 и поправочной Δt, поэтому вместо выражения (3) получаем:

$$(z-z_0)=n(t_0+\Delta t)$$

или

$$(z - z_0) = nt_0 + n\Delta t. \qquad (5)$$

По уравнению (5) каждая кинетическая кривая сорбции состоит из набора экспериментальных массивов t и С.

Для обработки экспериментальных данных по методу экспериментально-кинетического анализа точечные значения продолжительности процесса используются непосредственно, а текущая концентрация С пересчитывается на ($z - z_0$) по выражениям (3) и (4).

При этом, возникает необходимость определения точного значения равновесной концентрации металла в сорбенте, соответствующей полной статической обменной емкости (ПСОЕ).

Для этого в расчетах по каждой кинетической кривой в уравнении (1) задается первое поисковое значение ПСОЕ, например, заведомо меньше экспериментальной равновесной концентрации, затем рассчитывается ($z - z_0$) и далее по методу наименьших квадратов вычисляется n и Δnt, по которым определяются расчетные значения $(z - z_0)_p$, которые затем сравниваются с ($z - z_0$) по величине коэффициента корреляции, справедливого для линейных многофакторных зависимостей

$$\frac{dF}{A - BF} = ndt,$$

где $F = \frac{\overline{C}}{ПСОЕ}$ – степень насыщения сорбента;

ПСОЕ – полная статическая емкость сорбента (экспериментальная):

$$A = \frac{\overline{C_0}}{ПСОЕ}; \; B = \left(\frac{m_0}{W} + 1\right); \; n = \frac{3m_0}{r_0 \cdot c} \cdot \frac{Д}{д},$$

где Д – коэффициент внешней диффузии;

ρ – плотность сорбента;

δ – толщина диффузионного слоя.

Используя математическое описание процесса фильтрации представленное в программе Delphi7 можно выбрать оптимальные сорбционные материалы, их возможные комбинации для реализации различных задач при сорбционной очистке сточных вод.

Эксперимент

Для приготовления всех растворов использовались реактивы качества не ниже ч.д.а. и бидистиллированная вода. Необходимую для экспериментов величину pH получали добавлением азотной кислоты. Перед проведением экспериментов все ионообменные материалы промывали раствором хлорида натрия (10 г/л), а затем бидистиллированной водой до нейтральной величины pH смыва.

Исследование адсорбции ионов Cu^{2+} и Pb^{2+} на ионообменных материалах проводили в закрытых полипропиленовых конических колбах объемом 250 мл. 0,20-0,50 г сорбентов (в пересчете на сухой вес), заливали 100 мл раствора содержащего равное количество ионов каждого исследуемого металла, при pH 5.00±0.25. После отделения образца измеряли остаточные концентрации ионов тяжелых металлов в растворе ($C_{i,eq}$).

Концентрация ионов меди и свинца в рабочем растворе составляют: C_{Cu}=0,5-250 мг/л; C_{Cl}=0,5-60 мг/л. В диапазоне концентраций получены значения динамической и статической обменной емкости (ДОЕ) для различных матери-

алов после определения остаточных концентраций рисунки 1, 2.

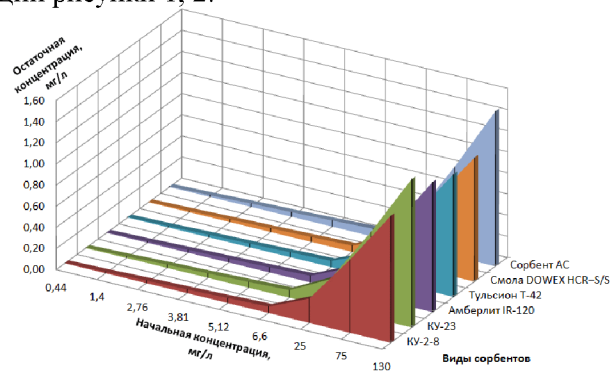


Рис. 1. Зависимость остаточных концентраций ионов меди в очищаемой среде.

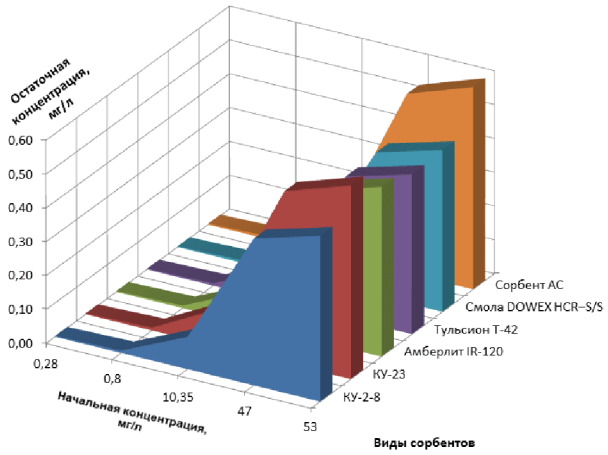


Рис. 2. Зависимость остаточных концентраций ионов свинца в очищаемой среде.

Таким способом возможно определить предельные значения для современных аналогов ионообменных материалов, результаты представлены в табл. 1, 2.

Таблица1. *Результаты статической обменной емкости ионитов для ионов хлора и фтора*

Марка анионита	АВ-17-8	АВ-17П	Амберлит IRA-458	Вофатит SBW	Варион АТ-660	Дауэкс SBR-(P)	Дауэкс MSA-1	Смола Purolite A–860	Тульсион А-72(МП)
Насыпная масса, кг/м^3	700	850	720	700	740	650	680	715	690
COE_{Cl}, мг-экв/г	5,62	4,63	5,46	5,62	5,32	6,05	5,78	5,5	5,7
COE_F, мг-экв/г	5,26	4,37	5,79	4,56	3,62	5,56	6,89	6,5	7,2

Из таблицы видны предельные значения СОЕ для анионов в ряду анионообменных фильтров, насыпные массы брались в диапазоне от 650-850 в зависимости от применяемого сорбционного материала для СВО-5.

Показано, что в условиях, приближенных к условиям очистки сточных вод, в области максимальных концентраций, большей избирательностью к ионам меди(II), обладают материалы: Смола DOWEX, Тульсион Т-42.

В области высоких концентраций, условно соответствующих концентрациям ионов хлора в сточных водах промышленных предприятий, максимальной конкурентной емкостью по анионам обладали материалы: Варион АТ-660, Амберлит IRA-458, Смола Purolite A–860.

Таким способом возможно определить предельные значения для современных аналогов ионообменных материалов.

Емкости по кислотным и основным группам определяли по классическому методу титриметрическим определением остаточной концентрации соляной кислоты или гидроксида натрия в растворах после проведения ионного обмена.

При наличии в растворе, контактирующем с ионообменным материалом, помимо удаляемого иона, других ионов, схожих по химической природе, имеет место процесс конкурентного связывания.

Статические обменные емкости по кислотным и основным группам характеризуют не только возможности материала по ионному об-

мену, но также, в случае тяжелых металлов, комплексообразующие свойства.

Таблица 2

Марка катионита	Насыпная масса, кг/м^3	Динамическая обменная емкость, мг-экв/м^3
АВ-17-8	700	518,33
АВ-17П	850	629,4
Амберлит IRA-458	720	533,14
Вофатит SBW	700	518,33
Варион АТ-660	740	547,95
Дауэкс SBR-(P)	650	481,31
Дауэкс MSA-1	680	503,52
Смола Purolite A–860	715	529,44
Тульсион А-72(МП)	690	510,93
КУ-2-8	820	516,11
КУ-23	700	440,58
Амберлит IR-120	800	503,52
Тульсион Т-42	850	535
Смола DOWEX HCR–S/S	840	528,7
Сорбент АС	670	421,7

Полученные результаты пересчитывали в значение равновесной адсорбции на материалах для каждого из ионов металлов (ммоль/г): $Xi=f(C_{Cu(II)},C_{Pb(II)})$. Результаты представляли в виде изотерм, затем, рассчитывали параметры конкурентного связывания.

В данном случае, наибольшим сродством к ионам меди(II) должны обладать материалы, имеющие не только карбоксильные, но и аминные группы.

Построены изотермы конкурентного связывания в координатах Ceq(мг-экв/л)-Xeq(мг-экв/г) (рис. 3-6).

Изотерма суммарной адсорбции, в большинстве случаев, принимает классическую форму Ленгмюра. Искажения характерны, в первую очередь, для изотермы обмена катиона с более низким сродством и происходят из-за его постепенного вытеснения, по мере увеличения концентрации свыше "точки насыщения", ионом с большим сродством к иониту.

Так для материалов по мере увеличения начальных концентраций после достижения насыщения и приближения значения суммарной адсорбции к асимптоте ($X_{Cu+Pb,\infty}$) происходит вытеснение (замена) ионов Cu^{2+} ионами Pb^{2+}.

Хотя изотерма суммарной адсорбции, схожа с классической, определить все параметры для отдельных ионов без построения трехмерных графиков, в общем случае, не удается. Последние, по результатам дополнительных исследований системы этих материалов для Cu^{2+} - Pb^{2+}, имеют вид схожий с положительной частью гиперболического параболоида рис. 3-6 ($C_{(Cu(II)}$, катион с меньшим сродством).

Схожие результаты для бинарной конкурентной сорбции, получены, например, в работе [16].

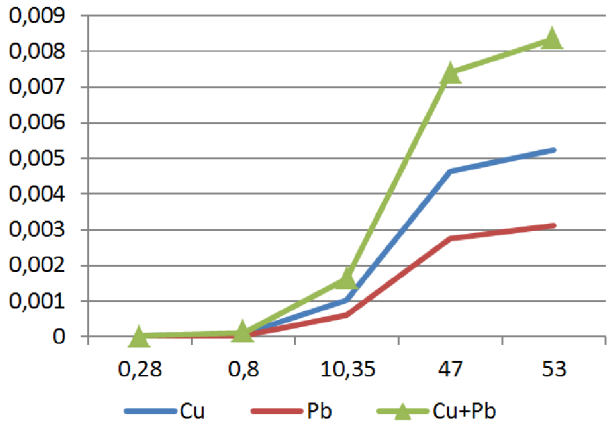


Рис. 3. Экспериментальные изотермы конкурентного связывания Cu(II)-Pb(II) для КУ-2-8

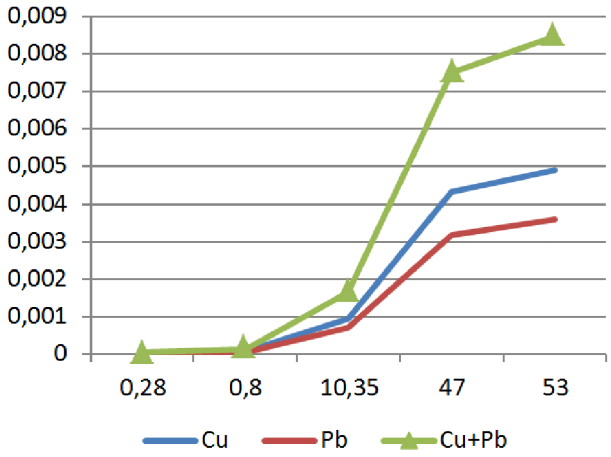


Рис. 4. Экспериментальные изотермы конкурентного связывания Cu(II)-Pb(II) для Амберлита IR-120

Несмотря на разнообразие применяемых адсорбентов, многие из них не удовлетворяют всему комплексу требований, предъявляемых к материалам подобного типа, в связи с чем поиск и разработка новых сорбционных материалов ведется постоянно [11].

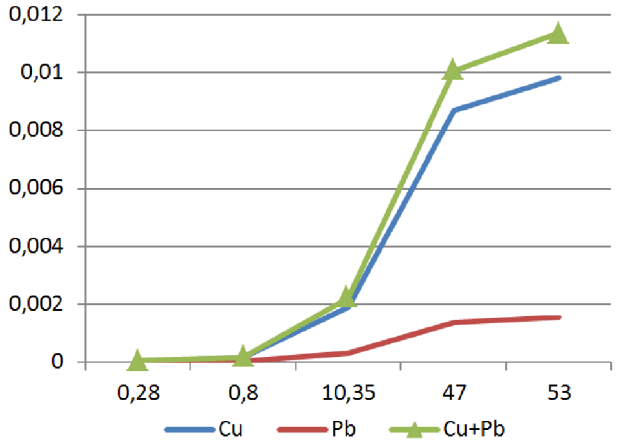


Рис. 5. Экспериментальные изотермы конкурентного связывания Cu(II)-Pb(II) для Тульсиона Т-42.

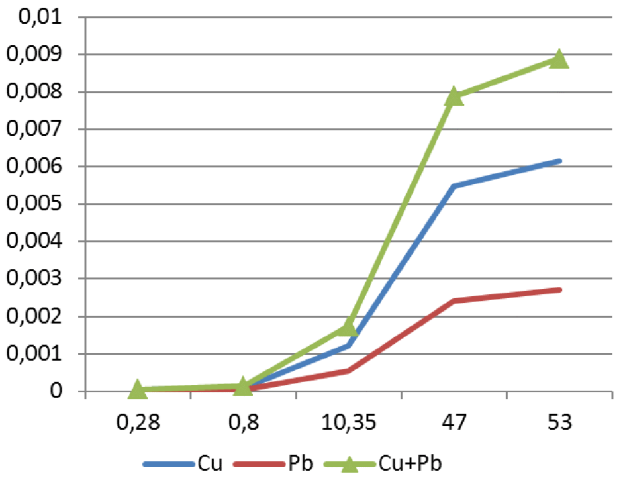


Рис. 6. Экспериментальные изотермы конкурентного связывания Cu(II)-Pb(II) для Смолы DOWEX HCR–S/S.

Особо приоритетным является получение сравнительно дешевых сорбционных материалов на базе отходов промышленности, поскольку при этом отходы вторично используются [7-10]. Отходы производства в качестве адсорбентов лишены главного недостатка большинства применяемых адсорбентов, особенно ионообменных смол, – высокой стоимости.

Плохо очищенные сточные воды поступают в природные водоемы, где тяжелые металлы накапливаются в воде и донных отложениях, становясь таким образом источником вторичного загрязнения. Соединения тяжелых металлов сравнительно быстро распространяются по объему водного объекта [12]. Частично они выпадают в осадок в виде карбонатов, сульфатов, частично адсорбируются на минеральных и органических осадках. Вследствие чего содержание тяжелых металлов в отложениях постоянно увеличивается, и когда адсорбционная способность осадков исчерпывается, тяжелые металлы поступают в воду, что и приводит к экологическому кризису [13-15].

Выводы

1. Для выбранных ионообменных материалов экспериментально получены изотермы конкурентного связывания, определены параметры сорбционных процессов в предельных случаях для низких и высоких концентраций ионов тяжелых металлов.
2. Найдены зависимости динамической и статической обменной емкости в диапазоне концентраций для исследуемых ионитов.
3. Показано, что в условиях, приближенных к условиям очистки сточных вод, в области максимальных концентраций, большей избирательностью к ионам меди(II), обладают материалы: Смола DOWEX, Тульсион Т-42. В области высоких концентраций, условно соответствующих концентрациям ионов свинца в сточных водах промышленных предприятий, максимальной конкурентной емкостью обладают Смола Purolite A–860 и Тульсион Т-42.
4. Используя математическое описание процесса фильтрации представленное в программе Delphi7 можно выбрать оптимальные сорбционные материалы, их возможные комбинации для реализации различных задач при сорбционной очистке сточных вод.

Список литературы

1. Скороходов В.Ф., Месяц С.П., Остапенко С.П. Решение проблемы очистки сточных вод промышленных предприятий от многокомпонентных загрязнений // Горный журнал. – 2010. – № 9. – С. 106–108.
2. Lin L-C., Juang R-S. Ion-exchange kinetics of Cu(II) and Zn(II) from aqueous solutions with two chelating resins // Chem. Eng. J. 2007. V.132 P. 205-210.
3. Heavy metals in waste. Final Report // European Commission DG ENV E3. – Denmark, 2002. – February. – 86 p.

4. Рогова О.Б., Водяницкий Ю.Н. Сорбция цинка и меди в почвах зоны воздействия Череповецкого металлургического комплекса // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева РАСХН. – 2010. – № 6. – С. 64–74.
5. Сукрушев А.В., Браславский Ю.В. Водный режим контуров АЭС: учеб. пособие. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2013. – 220 с.
6. 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.
7. Черкашина Н.И. Исследование эффективных сорбционных материалов для извлечения радионуклидов из технологических сред / Н.И. Черкашина, О.В. Ведищева // Материалам научно-практической конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности» (15 – 18 июня 2016 г., г. Севастополь). – Севастополь: СевГУ , 2016. – 356 с.
8. Черкашина Н.И. Технология получения сорбционных материалов на основе лигнина для утилизации жидких радиоактивных отходов / Н.И. Черкашина // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук – Севастополь: изд-во СНУЯЭиП, 2011. – С. 22.
9. Черкашина Н.И. Использование сорбентов на основе отходов переработки растительного сырья при очистке сточных вод и технологических сред / В.А. Ерофеев, Е.А. Культенко, Н.И. Черкашина // Экологическая безопасность.- 2013. - № 2 (16). - С. 89-92.
10. Пат. 78908 Украины, МПК51 B 01 J 20/22 (2006.01). Технология производства сорбента на основе лигнина (патент на изобретение) / Н.И. Черкашина, В.А. 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.
11. Guixia Zhao, Xilin Wu, Xiaoli Tan, Xiangke Wang. Sorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions: A Review // The Open Colloid Science Journal. – 2011. – № 4. – P.19–31.
12. Березин С.Е., Баженов В.И., Черненко А.В. Обоснование выбора технологиче- ского оборудования по очистке сточных вод // Наилучшие доступные технологии водо- снабжения и водоотведения. – 2014. - № 2 (апрель) – С. 48-58.
13. Пономарёв В.Г. Выбор сооружений для очистки сточных вод от взвешенных загрязнений // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2015. - № 1(февраль) – С. 45-52.
14. Данилович Д.А. Практика сравнения эффективности аэрационных систем // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2015. - № 4 (август) – С. 59-64.
15. Ярошевский А.Б., Гонголева А.А. Очистка медьсодержащих сточных вод гальванических производств щелочными сточными водами Актуальные проблемы социально-экономической и экологической безопасности Поволжского региона сборник материалов VIII международной научно-практической конференции. 2016. С. 85-88.
16. Lanjuan Li, Fuqiang Liu, Xiaosheng Jing, Panpan Ling, Aimin Li Displacement mechanism of binary competitive adsorption for aqueous divalent metal ions onto a novel IDA-chelating resin: Isotherm and kinetic modeling // Water research. 2011. V.45. P.1177- 1188.

References

1. Skorokhodov V. F., Mesyats S. P., Ostapenko S. P. solution to the problem of wastewater treatment of industrial enterprises from multi-component of pollution // Mining journal.. – 2010. – № 9. – С. 106–108.
2. Lin L-C., Juang R-S. Ion-exchange kinetics of Cu(II) and Zn(II) from aqueous solutions with two chelating resins // Chem. Eng. J. 2007. V.132 P. 205-210.
3. Heavy metals in waste. Final Report // European Commission DG ENV E3. – Denmark, 2002. – February. – 86 p.
4. Rogova O. B., Vodyanitskii, Yu. N. Sorption of zinc and copper in soils of the impact zone of Cherepovets metallurgical complex // Bulletin of Soil-governmental Institute. V. V. Dokuchaev. – 2010. – № 6. – С. 64–74.
5. Sucrose A. V., Braslavsky J. V. Water circuits of nuclear power plants: proc. allowance. – Sevastopol: SNUEI, 2013. – 220 c.
6. Cherkashina N.I., Cherkashin A. S, Maronchuk I. I. Ochistka stochnix vod ot ionov metallov sorbentami iz prirodni[materialov na osnove lignina [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.
7. Cherkashina N.I., Vedischeva V.A. Issledovanie effectivnosti sorbcionnix materialov dlja izvlechenijz radionuclidov iz texnologicheskij sred [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.
8. Cherkashina N.I. Texnologija polychenijz sorbcionnix materialov na osnove lignina dlja

ytilizacii jidkih radioaktivnix otxodov[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.

9. Cherkashina N.I., Erofeyev V.A, Kultenko E.A. ispolzovanie sorbentov na osnove othodov pererabotki rastitelnogo sirjz pri ochistke stochnix vod I tehnologicheskix sred [The use of sorbents based on waste processing of vegetable raw materials in the purification of wastewater and technological environments.] Environmental safety, 2013, the Issue Vol. 2(16) – Pp. 89-92.
10. 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. Metod proizvodstva modificirovannogo kostochkovogo sorbenta “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.
11. Guixia Zhao, Xilin Wu, Xiaoli Tan, Xiangke Wang. Sorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions: A Review // The Open Colloid Science Journal. – 2011. – № 4. – P.19–31.
12. Berezin S. E., Bazhenov V. I., Chernenko V. A. the Rationale for the selection of technological equipment for sewage treatment / Best available technologies of water supply and sanitation. – 2014. - № 2 (April) – P. 48-58.
13. Ponomarev, V. G. the Choice of structures for sewage treatment from suspended contaminants // the Best available technology of water and wastewater. – 2015. - № 1(February) – P. 45-52.
14. Danilovich D. A., the Practice of comparing the efficiency of the aeration systems // Best available technology of water and wastewater. – 2015. - №. 4 (August) – P. 59-64.
15. Yaroshevskii, A. B., Gogoleva A. A. Purification of copper-containing wastewater electroplating alkaline wastewater Actual problems of socio-economic and ecological safety of the Volga region the collection of materials of VIII international scientific-practical conference. 2016. P. 85-88.
16. Lanjuan Li, Fuqiang Liu, Xiaosheng Jing, Panpan Ling, Aimin Li Displacement mechanism of binary competitive adsorption for aqueous divalent metal ions onto a novel IDA-chelating resin: Isotherm and kinetic modeling // Water research. 2011. V.45. P.1177- 1188.

УДК 543.544-414

Разработка перспективных сорбентов на основе органического сырья для извлечения тяжелых металлов

Н.И. Черкашина[1], А.В. Любушкина[2]
ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]Selyanskij-AS@yandex.ru,[2]oleksandra.litvinova@mail.ru
Статья поступила 30.04.2018 г.; после доработки 10.05.2018 г.

Аннотация

Определены сорбционные характеристики: коэффициент очистки, коэффициент распределения, степень извлечения ионов металлов из раствора. Проведен сравнительный анализ степени извлечения с другими сорбционными материалами. Найдена по отношению к каким ионам металла проявляется наибольшая сорбционная способность в ряду Fe^{3+}, Co^{2+}, Pb^{2+} материала рисовая лузга.

Ключевые слова: фильтрация, граничные условия, ионообменные материалы, сорбция, обменная емкость, насыпная масса сорбента.

Development of perspective sorbents on the basis of organic raw materials for extraction of heavy metals

N.I. Cherkashina[1], A. V. Lyubushkina[2]
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st,, Sevastopol, 299053, Russia
[1]selyanskij-as@ya.ru, [2]*oleksandra.litvinova@mail.ru*

Received 30.04.2018 y.; received in final form 10.05.2018 y.

Abstract

Certain sorbcionnye is descriptions: cleaning coefficient, distributing coefficient, degree of extraction of ions of metals from solution. The comparative analysis of degree of extraction is conducted with other sorbcionnymi materials. Found in relation to what ions of metal most sorbcionnaya ability shows up among Fe^{3+}, Co^{2+}, Pb^{2+} of material of material rice husk.

Keywords: filtering, boundary conditions, ion exchange materials, dynamic exchange capacity, sorption, system, bulk weight of the sorbent.

Введение

Проблема очистки сточных вод АЭС, металлообрабатывающей промышленности, гальванических производств и сельскохозяйственных предприятий носит многоплановый характер. Это, в первую очередь, комплекс мер, направленных на очистку воды до состояния, в котором она может быть направлена в замкнутый цикл данного предприятия. Во - вторых, снижение концентрации вредных примесей до норм, предусмотренных ПДК для сброса сточных вод в хозяйственные водоемы [1]. И, наконец, концентрирование и извлечение из воды определенных компонентов, в частности, тяжелых и редкоземельных металлов, с последующей их регенерацией.

Сорбционные технологии, традиционно используемые для извлечения тяжелых металлов из водных растворов, являются достаточно эффективными. Концентрирование с помощью дешевых органических сорбентов на основе лигнина характеризуется эффективностью извлечения микроэлементов из растворов, простотой в выполнении и удобством для последующего определения исследуемых элементов различными методами анализа [2-3]. 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.

Недостатком полученных материалов является ограниченность сырьевых источников и сезонность их образования и накопления. Сюда входят: 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.

Лигнин, природный полимер, обладает некоторыми ионообменными способностями, но их недостаточно, чтобы его использовать в промышленных ионообменных процессах. Являясь природным полимером, составной частью растительного материала, он может быть использован с достаточной эффективностью и экономической целесообразностью при направленной модификации.

Эффективность очистки оценивалась по сточным водам, которые поступают в открытые водоемы (водохранилища, реки, озера и т.п.) и модельным растворам. Модельные растворы готовили из расчета по концентрации вредных примесей близких к сточным водам, которые превышают показатели предельно допустимых сбросов, мг/дм^3.

Эксперимент

За основу взята рисовая шелуха, после химико-термической обработки (в интервале температур от 200 до 700 °С). Из полученных модификаций наилучшие результаты показали две пробы измельченной рисовой шелухи: обжиг при 200 °С в течении 15 мин (сорбент №1); при 300 °С в течении 15 мин (сорбент №2). Сорбция ионов металлов проходила в статических условиях из растворов солей: $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ $PbCl_2$ и $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ марки «ч.д.а.» с концентрацией 0,5-250 мг/л. Далее пробы сорбента выдерживали в щавелевой кислоте в течении 24 часов, декантировали и промыли на фильтре дистиллированной водой до нейтральной среды. Сорбент выдерживали 24 часа в растворе соли сорбируемых ионов металлов.

Цель исследования

Целью проведения работ является изучения зависимости селективности извлечения для ионов металлов Fe^{3+}, Co^{2+}, Pb^{2+} сорбентом на основе лигнина от pH очищаемой среды.

В задачи работы входило

- исследовать сорбционную способность по отношению к ионам тяжелых металлов Fe^{3+}, Co^{2+}, Pb^{2+}, установить ряд активности в зависимости от pH среды;
- выявить зависимости некоторых сорбционных характеристик ($K_{оч}$, $K_р$) от величины pH очищаемой среды;
- определить рабочий диапазон pH для получения максимальных значений сорбционных характеристик ($K_{оч}$, $K_р$).

Определение содержания металлов в фильтрате осуществляли с помощью атомно-абсорбционного спектрофотометра Сатурн-4.

Результаты зависимости коэффициентов очистки и распределения от изменения pH среды и концентрации ионов металлов в растворе представлены в таблице 1, 2.

Таблица 1. *Зависимость Коч ионов Fe^{3+}, Co^{2+}, Pb^{2+} от величины pH*

pH	Коэффициент очистки по ионам металлов		
	Fe^{3+}	Pb^{2+}	Co^{2+}
3	9	15	13
5	27	23,5	31
7	48	73	33
9	35	57,2	28
13	13	18	22

Таблица 2. *Зависимость Кр ионов Fe^{3+}, Co^{2+}, Pb^{2+} от величины pH*

pH	Ионы металлов		
	Fe^{3+}	Pb^{2+}	Co^{2+}
3	18,1	19,8	9
5	36,7	53,3	18,6
7	43,6	139,1	22
9	29	88,8	18,3
13	19,9	57,4	13,3

За основу взята рисовая шелуха, после химико-термической обработки (в интервале температур от 200 до 700 °С). Из полученных модификаций наилучшие результаты показали две пробы измельченной рисовой шелухи:

- обжиг при 200 °С в течении 15 мин (сорбент №1);
- обжиг при 300 °С в течении 15 мин (сор-

бент №2).

Сорбция ионов металлов проходила в статических условиях из растворов солей:

$FeCl_3 \cdot 6H_2O$ $PbCl_2$ и $CoCl_2 \cdot 6H_2O$

марки «ч.д.а.» с концентрацией 0,5 - 250 мг/л.

Далее пробы сорбента выдерживали в щавелевой кислоте в течении 24 часов, декантировали и промыли на фильтре дистиллированной водой до нейтральной среды. Сорбент выдерживали 24 часа в растворе соли сорбируемых ионов металлов.

Концентрацию железа после сорбции определяли комплексонометрическим титрованием. Аликвоту 5 мл рабочего раствора Fe^{3+} оттитровали 0,1 М раствором трилона Б в присутствии (индикатора) сульфосалициловой кислоты до перехода окраски с розовой в желтую.

Концентрация ионов металлов определялась по формуле:

$$C_{(ионов)} = \frac{C_{трилон\ Б} \cdot V_{трилон\ Б}}{V_{аликвоты}}, \quad (1)$$

$C_{(ионов)}$ - концентрация ионов, мг/л;

$C_{трилон\ Б}$ - концентрация трилона Б, мг/л;

$V_{аликвоты}$ – объем аликвоты, мл;

$V_{трилон\ Б}$ – объем трилона Б, мл.

Концентрацию кобальта после сорбции определяли комплексонометрическим титрованием. Отобрали аликвоту 5 мл рабочего раствора, прибавили аммиачный буфер до pH = 8, добавили 20 мл воды, оттитровали 0,1 М раствором трилона Б с индикатором мурексид до перехода коричнево-желтой в винно-красную.

Концентрацию свинца после сорбции определяли комплексонометрическим титрованием. Отобрали аликвоту 5 мл рабочего раствора, оттитровали трилоном Б в присутствии индикатора ксиленолового оранжевого.

По полученным экспериментальным данным определены сорбционные характеристики.

Расчет коэффициента очистки [4, 5]:

$$K_{оч.} = \frac{C_{исх.}}{C_{равн.}}, \quad (2)$$

где $K_{оч.}$ - коэффициент очистки исследуемого параметра (ионы металлов);

$C_{исх.}$ - концентрация исходного раствора, М;

$C_{равн.}$ - концентрация раствора после фильтрации, М.

По способности поглощаться исследованные катионы могут быть расположены в следующий ряд активности: $Fe^{3+} > Pb^{2+} > Co^{2+}$. Сравнительная характеристика по степени извлечения ионов тяжелых металлов с некоторыми другими сорбентами представлена на рис.1.

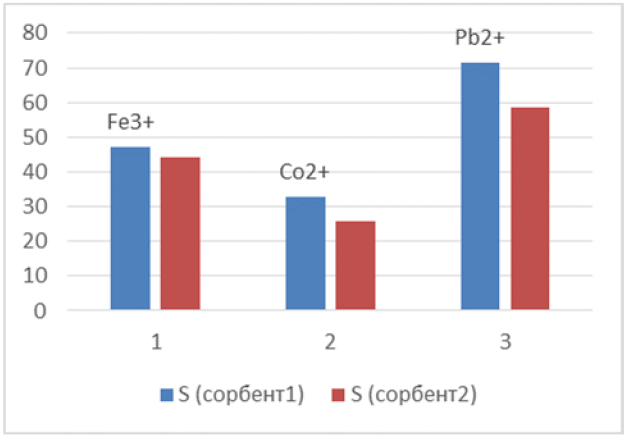


Рис. 1. Величина степени извлечения для металлов для металлов Fe^{3+}, Co^{2+}, Pb^{2+}.

Адсорбционную избирательность, выраженную коэффициентом распределения иона металла между твердой фазой и раствором, вычисляли по формуле [4, 5]:

$$K_p = \frac{C_o - C_p}{C_p} \cdot \frac{v}{m}, \quad (3)$$

где K_p – коэффициент распределения, мл/г;

C_0 – концентрация исходного раствора, мг/л;

C_p – концентрация раствора после контактирования с сорбентом, мг/л;

v – объем заливаемого раствора, мл;

m – масса навески, г.

Результаты распределения K_p в зависимости от ионов металлов представлены на рис. 2.

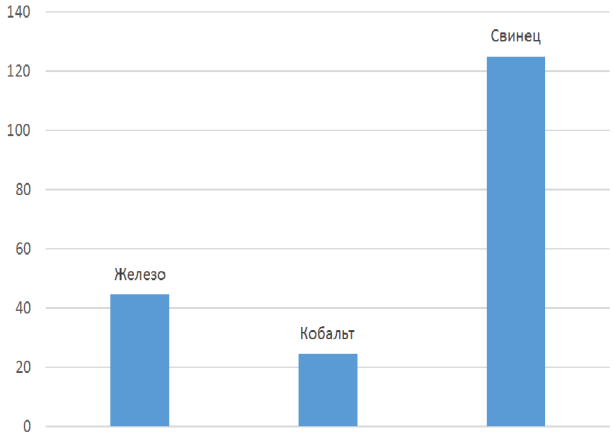


Рис. 2. Величина коэффициента распределения для металлов Fe^{3+}, Co^{2+}, Pb^{2+}.

Сорбционная способность композитов исследовалась следующим образом:

$FeCl_3 \cdot 6H_2O$ $PbCl_2$ и $CoCl_2 \cdot 6H_2O$.

Навески сорбента массой 2 г приводились в равновесие с 50 $см^3$ растворов с концентрацией

0,01– 0,1 при 25 °С на фоне постоянного значения pH. Предварительно установленное время наступления равновесия составило 2 суток. Растворы до и после сорбции анализировались на содержание ионов металлов комплексонометрическим методом:

По полученным данным рассчитывалась удельная сорбция Г по уравнению [6-7]:

$$\Gamma = \frac{(C_o - C_p)\cdot v}{m}, \quad (4)$$

где C_0 – концентрация исходного раствора, г/мл;

C_p – концентрация раствора после контактирования с сорбентом, г/мл;

v – объем заливаемого раствора, мл;

m – масса навески, г.

Опыты проводились в трехкратной повторности. Относительные стандартные отклонения были в пределах 0,5-5%. По полученным данным строились изотермы сорбции в координатах Г – Ср, рис. 3.

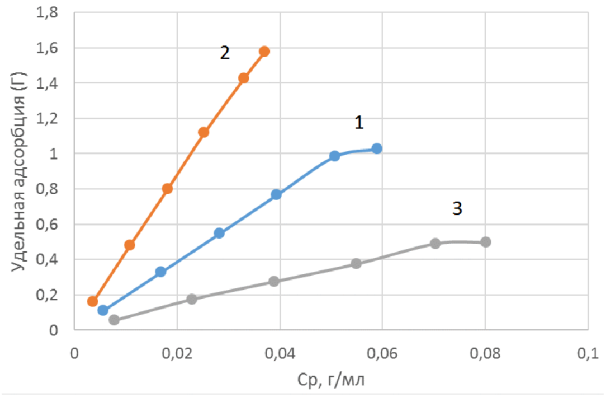


Рис. 3. Зависимость удельной сорбции ионов металла (Г) от равновесной концентрации (С) на исследуемых сорбентах: 1 - Fe^{3+}, 2 - Co^{2+}, 3 - Pb^{2+}.

Концентрация ионов железа, кобальта и свинца в рабочем растворе составляют от 0,5 - 250 мг/л. В диапазоне концентраций получены значения для модификации 1 и 2 после определения остаточных концентраций рис. 4.

В дальнейших исследованиях необходимо выявить зависимость сорбционных характеристик по ионам металлов от pH среды, температуры и концентрации органических примесей и солей.

Исследования характеристик сорбентов при воздействии на технологические среды и процессов переноса агентов в среде к сорбенту являются важнейшим этапом при разработке эффективных сорбционных материалов и актуальной темой для научных исследований.

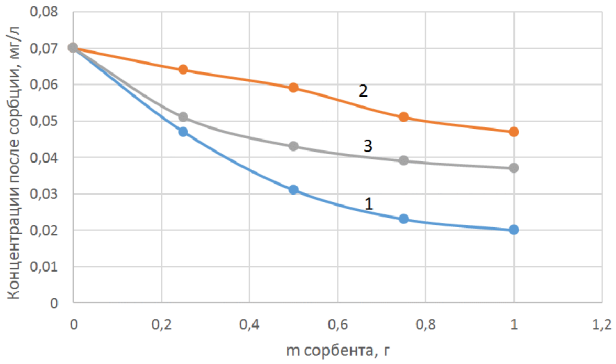


Рис 4. Зависимость остаточной концентрации от массы сорбента: 1 - Fe^{3+}, 2 - Co^{2+}, 3 - Pb^{2+}.

Механохимическая обработка лигнина с неорганическими модификаторами приводит к активации и изменению количественного и качественного функционального состава.

Выводы

- исследована сорбционная способность по отношению к ионам тяжелых металлов Fe^{3+}, Co^{2+}, Pb^{2+};
- выявлены зависимости некоторых сорбционных характеристик ($K_{оч}$, K_p) от величины pH очищаемой среды;
- максимальные значения сорбционных характеристик ($K_{оч}$, K_p) получены в диапазоне pH от 6 до 9;
- испытания его на различных объектах показали, что он может быть пригодным для очистки жидких стоков от катионов тяжелых металлов, включая катионы железа, свинца и т.д.;
- сорбционные материалы на основе лигнина отличаются высокой химической инертностью. Этот факт гарантирует его длительную эксплуатацию без разрушения и повторного загрязнения очищаемых объектов.

Видно, что с увеличением времени контакта сорбента и раствора, K_p и K_o продолжают увеличиваться, но происходит это не столь стремительно, как в начальный момент времени, а более постепенно. Это обусловлено тем, что происходит «насыщение» сорбента и увеличивается вероятность проскока ионов сорбируемого вещества.

Можно предположить, что тяжелые металлы с карбоксильными группами фрагментов лигнина будут образовывать многоядерные комплексы состава $FeO_2COOЛиг_n$. При образовании таких комплексов существенно увеличивается обменная емкость по отношению к катионам. Оптимальная область для комплексообра-

зования pH = 5 - 10. Причем при повышении pH прочность металлокомплексов увеличивается. Сорбенты на основе лигнина гидролизного представляют собой особую группу полимерных ионообменных материалов.

В дальнейшем необходимо произвести испытания в динамических условиях на натурных объектах для подтверждения эффективности использования данного сорбента.

Список литературы

1. Сыч Н.В. Переработка кизиловой косточки в высокопористые сорбционные материалы // Н.В. Сыч / Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2008. – № 3. – С. 54–57.
2. Черкашина Н.И. Анализ характеристик сорбционной способности сорбента «ФОЛИОКС-КГО» / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев // Матер. XII Междунар. конф. «Экология и развитие общества». – СПб: Сосновый Бор, 2009. – С. 64 - 66.
3. Черкашина Н.И. Характер зависимости эффективности очистки дезактивационных вод сорбентом «Фолиокс-КГО» при изменении концентрации солей и поверхностно активных веществ / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев, В.Б. Копарушкина // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2010. – Вып. 1 (33). – С. 90 – 95.
4. Demirbas A. Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review // J. Hazard. Mater. – 2008. – V. 157, N 2–3. – P. 220–229.
5. Puziy A.M., Poddubnaya O.I., Martinez Alonso A. et al. Surface chemistry of phosphorus-containing carbons of lignocellulosic origin // Carbon. – 2005. – V. 43, N 14. – P. 2857–2868.
6. Ерофеев В.А. Очистка рапных вод и технологических сред первого контура от радионуклидов и нефтепродуктов сорбентами на основе лигнина / В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина // Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2009. – Вып. 2 (30). – С. 67 - 72.
7. Пат. 78908 Украины, МПК51 B 01 J 20/22 (2006.01). Технология производства сорбента на основе лигнина (патент на изобретение) / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофееф.; заявитель и патентообла- датель Севастопольский нац. ун–т ядерной енергии и промыщленности. – № u 2012 09109; заявл. 10.04.2013; опубл. 12.07.13, Бюл. № 7. – 5 С.
8. 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.
9. Черкашина Н.И. Исследование эффективных сорбционных материалов для извлечения радионуклидов из технологических сред / Н.И. Черкашина, О.В. Ведищева // Материалам научно-практической конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности» (15 – 18 июня 2016 г., г. Севастополь). – Севастополь: СевГУ , 2016. – 356 с.
10. Черкашина Н.И. Технология получения сорбционных материалов на основе лигнина для утилизации жидких радиоактивных отходов / Н.И. Черкашина // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук – Севастополь: изд-во СНУЯЭиП, 2011. – С. 22.
11. Черкашина Н.И. Использование сорбентов на основе отходов переработки растительного сырья при очистке сточных вод и технологических сред / В.А. Ерофеев, Е.А. Культенко, Н.И. Черкашина // Экологическая безопасность.- 2013. - № 2 (16). - С. 89-92.

References

1. Sych N. In. Processing cornaceous bone in highly porous sorption materials // N.I. Sych / EcoTechnologies and resource saving. - 2008. – N 3. - P. 54-57.
2. Cherkashina N. I. Analysis of characteristics of sorbent sorption capacity "FOLIOKS-KGO" / N. I. Cherkashina, V. A. Erofeev // Mater. XII international. Conf. "Ecology and society development". - St. Petersburg: Pine Forest, 2009. – P. 64 - 66.
3. 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.
4. Demirbas A. Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review // J. Hazard. Mater. – 2008. – V. 157, N 2–3. – P. 220–229.
5. Puziy A.M., Poddubnaya O.I., Martinez Alonso A. et al. Surface chemistry of phosphorus-containing carbons of lignocellulosic origin // Carbon. – 2005. – V. 43, N 14. – P. 2857–2868.
6. Cherkashina N.I., Erofeyev V.A. Ochistka trapnix vod I texnologicheskih sred pervogo kontura ot radionyklidov I nefteproduktov sorbenta na osnove lignina [Cleaning floor drain waters and fluids of the primary circuit from radionuclides and petroleum sorbents based on lignin] Water purification, 2011, Vol. 10, P.40-44.
7. 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. Metod proizvodstva modificirovannogo kostochkovogo sorbenta “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.
8. Cherkashina N.I.,. Cherkashin A. S, Maronchuk I. I.

Ochistka stochnix vod ot ionov metallov sorbentami iz prirodni[materialov na osnove lignina [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.

9. Cherkashina N.I., Vedischeva V.A. Issledovanie effectivnosti sorbcionnix materialov dlja izvlechenijz radionuclidov iz texnologicheskij sred [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.
10. Cherkashina N.I. Texnologija polychenijz sorbcionnix materialov na osnove lignina dlja ytilizacii jidkih radioaktivnix otxodov[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.
11. Cherkashina N.I., Erofeyev V.A, Kultenko E.A. ispolzovanie sorbentov na osnove othodov pererabotki rastitelnogo sirjz pri ochistke stochnix vod I tehnologicheskix sred [The use of sorbents based on waste processing of vegetable raw materials in the purification of wastewater and technological environments.] Environmental safety, 2013, the Issue Vol. 2(16) – Pp. 89-92.

УДК 630.867:661.183.2

Конкурентная сорбция лигниновых препаратов для очистки сточных вод

Н.И. Черкашина[1], А.В.Любушкина[2], А.О.Литвинова[3]
ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1]selyanskij-as@ya.ru, [2]*oleksandra.litvinova@mail.ru*

Статья поступила 03.05.2018 г.; после доработки 10.05.2018 г.

Аннотация

Приведены обобщённые результаты лабораторных испытаний сорбентов на основе рисовой лузги для очистки сточных вод на модельных растворах для ионов железа и свинца. В результате анализа были получены коэффициенты очистки и распределения, которые являются количественными показателями эффективности сорбционных материалов.

Ключевые слова: сорбционные материалы, фильтрация, коэффициент очистки, коэффициент фильтрации, лигнин

Competitive sorption ligninov drugs for the treatment of wastewater

N.I. Cherkashina[1], A. V. Lyubushkina[2], A. O. Litvinova[3]
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st,, Sevastopol, 299053, Russia
[1]selyanskij-as@ya.ru, [3]*oleksandra.litvinova@mail.ru*

Received 03.05.2018 y.; received in final form 10.05.2018 y.

Abstract

The generalized results of laboratory tests of sorbents based on rice husk for wastewater treatment on model solutions for iron and lead ions are presented. As a result of the analysis, purification and distribution coefficients were obtained, which are quantitative indicators of the efficiency of sorption materials.

Keywords: sorption materials, filtration, purification coefficient, the coefficient of the filter is tion, lignin.

Введение

В настоящее время очистка сточных вод предприятий от ионов металлов является актуальной экологической проблемой.

Опасны такие распространенные металлы: медь, свинец, железо, никель и цинк, попадая в обычные канализационные стоки, они нарушают работу очистных систем и отравляют водоемы [1].

Для их удаления из растворов используют такие методы, как реагентная обработка или ионный обмен, так же популярны мембранные методы. Доступными и эффективными, наиболее простыми и менее дорогостоящими, являются сорбционные методы очистки. Используются в качестве дешевых сорбентов различные продукты растительного происхождения: хитинсодержащие материалы, полученные при комплексной переработке сырья биогенного происхождения (криль, креветка, крабы и др.), щепа, кора, плодовые косточки, соевые шроты, шелуха, скорлупа, пустые стручки сельскохозяйственных культур. Нами исследована эффективность разработанной модификации органического сорбента и возможность его использования для очистки технологических сред от ионов тяжелых металлов на штатных средствах очистки.

Уровни загрязнения образующихся сточных вод в соответствии с действующим законо-

дательством не позволяют сбрасывать последние непосредственно в гидрографическую сеть без их предварительной очистки [2].

В работе использовался сорбент, полученный в результате обжига рисовой шелухи при 300 °С (образец 2), обладает более высокой сорбционной емкостью по отношению ко всем извлекаемым ионам металлов в сравнении с рисовой шелухой при 200 °С (образец 1).

Механохимическая обработка лигнина с неорганическими модификаторами приводит к активации и изменению количественного и качественного функционального состава его. Полученный сорбционный материал может обладать ионообменными свойствами к полярным компонентам и адсорбционными по отношению к неполярным [3]. Преобладание того или иного свойства будет зависеть от способа модификации (введенных функциональных групп, увеличения поверхности контакта).

Постановка цели и задач научного исследовании

Целью научного исследования является разработка эффективного сорбционного материала на основе отходов растительного сырья.

Для достижения поставленной цели необходимо провести испытания сорбента на основе лигнина для очистке сточных вод на модельных растворах, определить некоторые сорбционные характеристики.

Порядок и параметры эксперимента

Разработанные ранее сорбционные материалы на основе лигнина надежно локализуют радиоактивные вещества и органические примеси при переработке радиоактивных отходов АЭС [3-6].

Результаты исследований показывают, что термообработка исходного сырья (рис. 1) существенно изменяет состав и структуру полученных образцов (рис. 2), влияя на их сорбционную способность [7].

За основу взята рисовая шелуха, после химико-термической обработки (в интервале температур от 200 до 700 °С). Из полученных модификаций наилучшие результаты показали две пробы измельченной рисовой шелухи: обжиг при 200 °С в течении 15 мин (сорбент № 1); при 300 °С в течении 15 мин (сорбент № 2). Сорбция ионов металлов проходила в статических условиях из растворов солей: $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ $PbCl_2$ марки «ч.д.а.» с концентрацией 0,5 - 250 мг/л.

При постоянной навеске 1 г, заливали 50 $см^3$ растворами с одновременным присутствием солей.

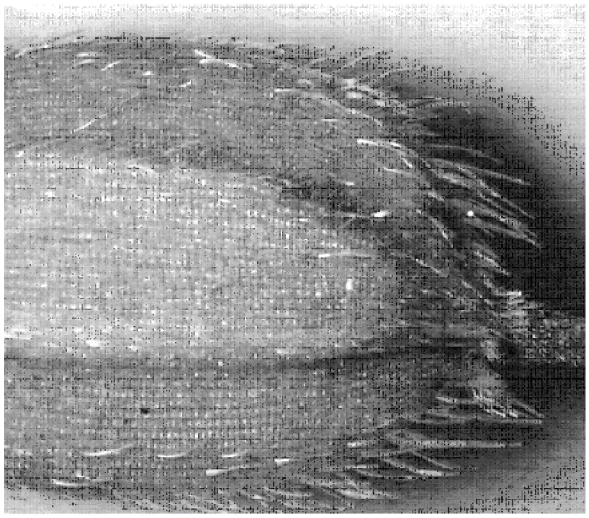


Рис. 1. Микрофотографии рисовой шелухи исходной.

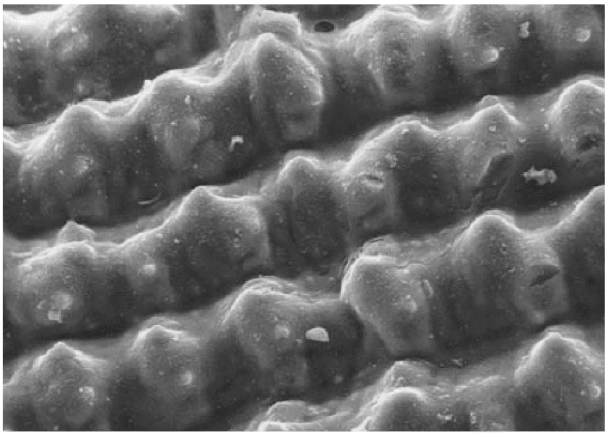


Рис. 2. Микрофотографии рисовой шелухи после термообработки 550 °С

Раствор перемешали и оставили до достижения равновесия (24 часа). Количество непрореагировавшего иона металла определяли комплексонометрическим титрованием.

Количество сорбированных ионов в значительной степени зависит от формы сорбента. Значения pH растворов менялись только в результате гидролиза солей от 6,10 до 5,65 для Pb(II); от 4,35 до 3,02 для Fe (III) в зависимости от концентрации металла.

По полученным данным рассчитывалась удельная сорбция Г по уравнению:

$$\Gamma = \frac{(C_o - C_p) \cdot v}{m}, \qquad (1)$$

где C_0 – концентрация исходного раствора,

моль/л;

C_p – концентрация раствора после контактирования с сорбентом, моль/л;

v – объем заливаемого раствора, мл;

m – масса навески, г.

Результаты представлены на рис.3-4.

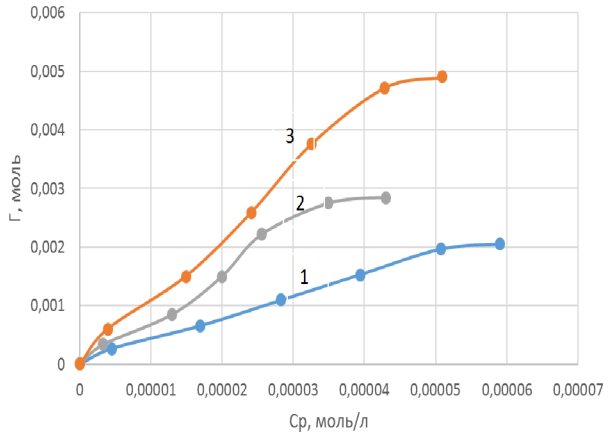


Рис.3. Влияние концентрации металлов на совместную сорбцию для модификации №1: 1- ионы Fe (III); 2- ионы Pb(II); 3 – ионы Fe (III)+Pb(II).

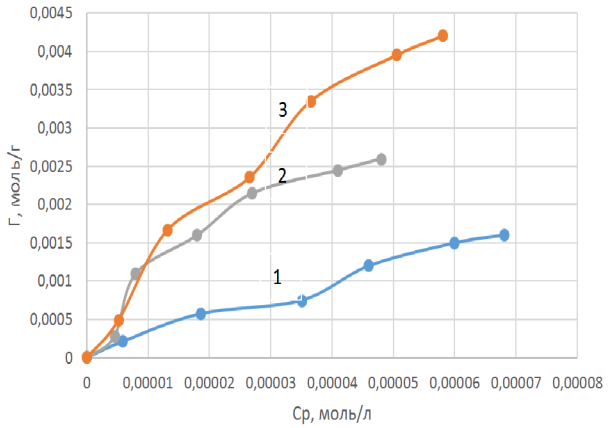


Рис.4. Влияние концентрации металлов на совместную сорбцию для модификации №2: 1- ионы Fe (III); 2- ионы Pb(II); 3 – ионы Fe (III)+Pb(II).

Исследовалась зависимость коэффициента очистки и коэффициента распределения от pH, скорости фильтрации, объема пропускаемой пробы.

Определение и анализ сорбционных характеристик

По результатам анализа рассчитывали коэффициенты очистки $К_{оч}$ и распределения $k_р$, которые являются количественными показателями эффективности сорбционных материалов. Расчет вели по формулам (1) и (2):

$$k_{оч.п} = \frac{B_{исх.п.}}{B_{п.п.ф.}}, \qquad (2)$$

где $k_{оч.п}$ – коэффициент очистки исследуемого параметра (ионы железа и свинца);

$B_{исх.п.}$- величина исходного параметра (концентрация железа и свинца, суммарная концентрация исследуемого раствора);

$B_{п.п.ф.}$- величина параметра после фильтрации (концентрация железа и свинца после фильтрации, суммарная концентрация раствора после фильтрации).

В качестве количественных характеристик взаимодействия сорбента на основе рисовой лузги с ионами Fe^{3+}, Pb^{2+} были рассчитаны коэффициенты распределения (Кр, $см^3/г$).

Расчет коэффициента распределения выполняли по формуле [8-9]:

$$Kp = [(C_0 - C_i) / C_i] \cdot V/m, \text{ мл/г}, \qquad (3)$$

где: $К_р$ – коэффициент распределения;

$К_{оч}$ – коэффициент очистки;

C_0 - исходная концентрация загрязнения модельного раствора;

C_i – конечная концентрация загрязнения модельного раствора (после фильтрации раствора);

V – объем исследуемого раствора, отфильтрованный на момент отбора пробы, мл;

m – масса сорбента, г.

Исследования проводились в идентичных условиях для образца № 1 при значениях pH равных 10,5; 7,0; 3,5.

Результаты лабораторных исследований и стендовых испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1. *Результаты лабораторных исследований проведенные при pH=3,5*

$К_{оч}$	C_0, г/л	Ci_{Pb1}, г/л	Ci_{Fe1}, г/л	Ci_{Pb2}, г/л	Ci_{Fe2}, г/л
4,47	29	6,4	6,5	6,9	7
9,55	29	3,02	3,2	2,02	2,2
14,325	29	2,0	2,1	1,5	1,6
19,1	29	1,5	1,7	1,1	1,2
28,65	29	1,05	1,09	0,5	0,9
38,2	29	0,76	0,8	0,3	0,6

Более наглядно результаты лабораторных исследований отражены на рис. 5, 6.

Приведенные выше коэффициенты очистки и распределения показывают эффективность использования данного сорбента для очистки сточных вод от ионов Fe^{3+}, Pb^{2+}.

Установлено, что оптимальными параметрами, обеспечивающими наибольшую эффективность очистки являются следующие.

Скорость фильтрации – 2 мл/мин:

- при pH = 3,5 $К_{оч}$ = 9 - 10,
- при pH = 7 $К_{оч}$ = 12 - 15,
- при pH = 10,6 $К_{оч}$ = 13 - 14;
- при практически стабильных коэффициентах распределения $К_{р1}$=1,3 – 1,35, $К_{р2}$ = 1,3 -1,4 в установленных границах pH.

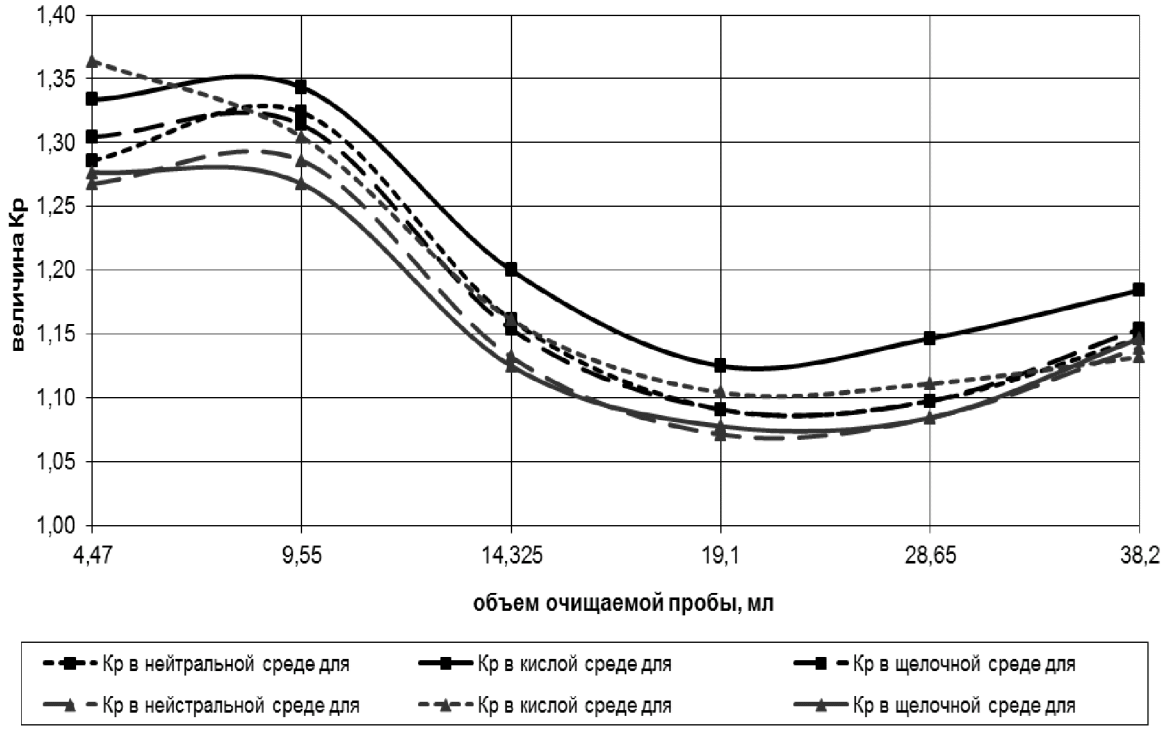


Рис.5. График зависимости коэффициента очистки $К_{оч}$ от колоночного объема для различной реакции среды при использовании модификаций: ■ - № 1, ▲ - № 2.

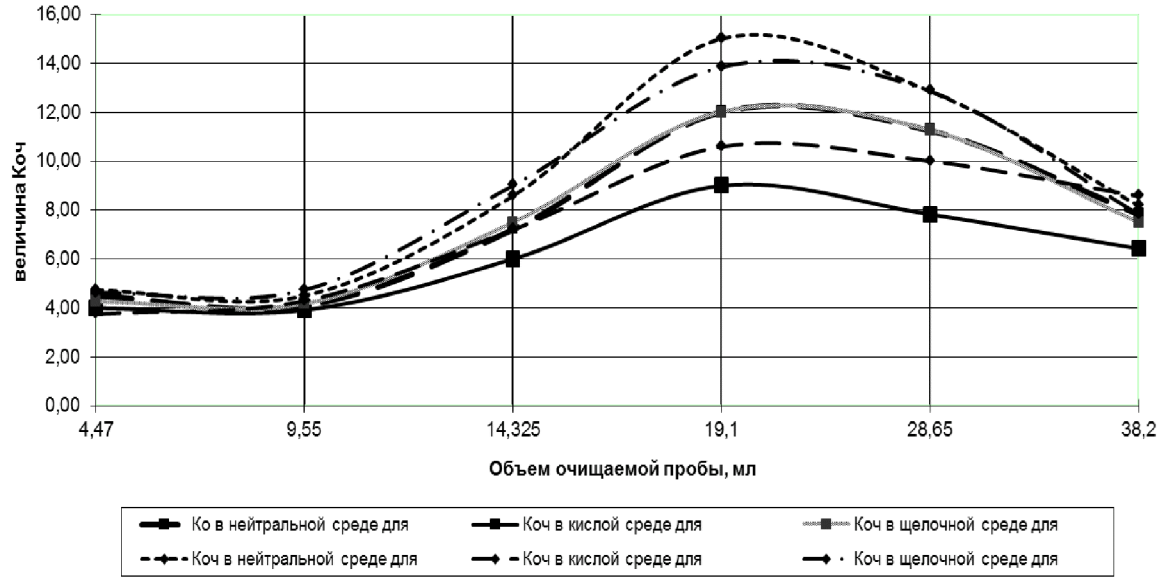


Рис.6. График зависимости коэффициента распределения $К_р$ от колоночного объема для различной реакции среды в случаи использования модификации: ■ - № 1, ▲ - № 2.

Исследования проводились с использованием ФЭК-56. Результаты экспериментов приведены в виде графиков, а зависимости коэффициентов очистки и распределения от pH представлены на рис. 7 и 8.Наблюдаются довольно высокие значения коэффициента очист-

ки. Из графиков зависимостей видно, что с ростом pH, объема пробы и скорости фильтрации наблюдается понижение коэффициента очистки и рост коэффициента распределения.

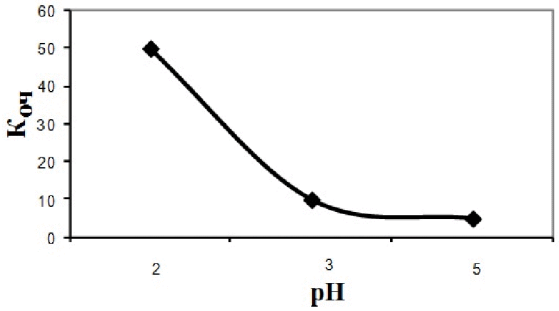


Рис.7 Зависимость коэффициента очистки от pH для модификации №1.

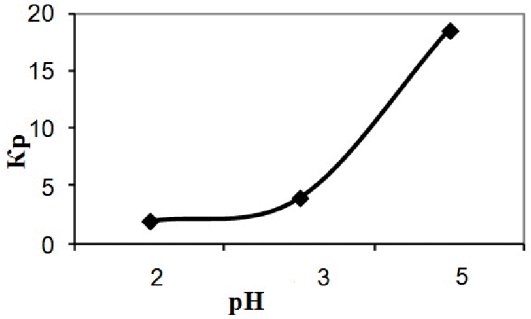


Рис.8 Зависимость коэффициента распределенияи от pH для модификации №1.

Выводы

В результате анализа были получены коэффициенты очистки и распределения, которые являются количественными показателями эффективности сорбционных материалов.

Установлено, что данный сорбционный материал хорошо сорбирует не только тяжелые металлы, но другие примеси (анионы хлора, фтора, органические соединения), это дает возможность использовантъ данные модификации сорбента наряду с промышленными селективними неорганическими сорбентами для очистки технологических сред сложного качественного и количественного состава.

Отмечено, что после очистки модельных растворов сточных вод среда соответствует санитарным нормам для сброса в окружающую среду и не относится к категории токсичных отходов. По результатам испытаний можно сделать вывод о перспективности и возможности использования сорбента для очистки технологических сред с высокой концентрацией солей железа и свинца. Использование сорбентов на основе лигнина позволит заменить фильтрующий материал на основе активированных углей и перлита и одновременно уменьшить нагрузку на ионитовые фильтры, предназначенных для очистки технологических сред от солей, увеличивая их фильтроцикл.

Список литературы

1. Мартовицкий В.Д. Шахтная вода как ресурс водоснабжения (состояние, проблемы, перспективы) / В.Д. Мартовицкий, Д.П. Родин, М.Е. Григорюк и др. ж. Инженерная Экология, М.: - 2005. - №2. - С. 27-40.
2. Черкашина Н. И. К вопросу о взаимодействии лигнинов с неорганическими модификаторами при механохимической обработке / Н. И. Черкашина, В. А. Ерофеев // Сборник научных трудов СНУЯЭ и П. – 2011. – № 2 (38). – С. 184-189.
3. Пат. 78908 Украины, МПК51 B 01 J 20/22 (2006.01). Технология производства сорбента на основе лигнина (патент на изобретение) / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофееф.; заявитель и патентообла- датель Севастопольский нац. ун–т ядерной енергии и промыщленности. – № u 2012 09109; заявл. 10.04.2013; опубл. 12.07.13, Бюл. № 7. – 5 С.
4. Пат. 93824 Украины. Технология производства сорбента на основе лигнина / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев.; заявитель и патентообладатель Севастопольский нац. ун–т ядерной энергии и промышленности. – № a 2013 93824; заявл. 10.04.2013;опубл. 12.07.13,Бюл. № 23 (I ч.). – 6 С.
5. Черкашина Н.И. Очистка трапных вод и технологических сред первого контура от радионуклидов и нефтепродуктов сорбентами на основе лигнина / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев // Водоочистка. - 2011. - № 10. - С. 40-44.
6. Черкашина Н.И. Технология получения сорбционных материалов на основе лигнина для утилизации жидких радиоактивных отходов / Н.И. Черкашина // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук – Севастополь: изд-во СНУЯЭиП, 2011. – С. 22.
7. Шевелева И.В. Сорбенты на основе рисовой шелухи для удаления ионов Fe(III), Cu(II), Cd(II), Pb(II) из растворов / И.В. Шевелева, А.Н. Холомейдик, А.В. Войт, Л.А. Земнухова // Химия растительного сырья. - 2009. - №4. -С. 171–176.
8. 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.

9. Черкашина Н.И. Исследование эффективных сорбционных материалов для извлечения радионуклидов из технологических сред / Н.И. Черкашина, О.В. Ведищева // Материалам научно-практической конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности» (15 – 18 июня 2016 г., г. Севастополь). – Севастополь: СевГУ , 2016. – 356 с.

References

1. Fedoseeva, O. P., Tunitsky N. N., Cherneva, E. P. Investigation of the kinetics of the complete exchange of cations on sulfonol // research in the field of ion exchange, the distribution and sedimentary chromatography. – M.: publishing house of the Russian Academy of Sciences, 1999. – P. 63-69.
2. Cherkashina N. I., Erofeev V. A. K voprosy o vzaimodeistvii ligninov s neorganicheskimi modificatorami pri mexanicheskoi obrabotke [To the question about the interaction of lignin with inorganic modifiers to the mechanochemical treatment] Collection of scientific works SNUNE and I P.– 2011. – № 2 (38). – S. 184-189.
3. 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. Metod proizvodstva modificirovannogo kostochkovogo sorbenta “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.
4. Cherkashina N.I., Erofeev V. A. Pat. 93824 Ukraine. Texnologija proizvodstva sorbrnta na osnove lignina [The production technology of the sorbent on the basis of lignin]; applicant and patentee of the of Sevastopol national University of nuclear energy and industry № A 2013 93824; Appl. 10.04.2013;publ. 12.07.13,bull. No. 23 (I h)..- P 6.
5. Cherkashina N.I., Erofeyev V.A. Ochistka trapnix vod I texnologicheskih sred pervogo kontura ot radionyklidov I nefteproduktov sorbenta na osnove lignina [Cleaning floor drain waters and fluids of the primary circuit from radionuclides and petroleum sorbents based on lignin] Water purification, 2011, Vol. 10, P.40-44.
6. Cherkashina N.I. Texnologija polychenijz sorbcionnix materialov na osnove lignina dlja ytilizacii jidkih radioaktivnix otxodov[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.
7. Sheveleva I. V. sorbents based on rice husk for removal of ions Fe (III), Cu (II), Cd (II), Pb (II) from solutions / I. V. Sheveleva, A. N. Holomeydik, A.V. voit, L. A. zemnukhova / / Chemistry of plant raw materials. - 2009. - N. 4. -P. 171-176
8. Cherkashina N.I., Cherkashin A. S, Maronchuk I. I. Ochistka stochnix vod ot ionov metallov sorbentami iz prirodni[materialov na osnove lignina [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.
9. Cherkashina N.I., Vedischeva V.A. Issledovanie effectivnosti sorbcionnix materialov dlja izvlechenijz radionuclidov iz texnologicheskij sred [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.

УДК 621.325

Разработка СВЧ метода высокоточного измерения процентного содержания воды в водонефтяной смеси

И.Б. Широков [1], И.И. Марончук[2]

[1]*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул.Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, shirokov@ieee.org*

[2]*ООО «Генезис-Таврида», ул. Щербака, 5, г.Севастополь, 299011, Россия, igimar@mail.ru*

Статья поступила 02.04.2018 г.; после доработки 09.04.2018 г.

Аннотация

В работе описан новый метод определения процентного содержания воды в водонефтяной смеси, основанный на применении микроволнового канала связи для проведения измерений набега фазы с одновременной оценкой степени поглощения микроволнового сигнала в исследуемой смеси.

Ключевые слова: нефть, нефтепродукты, вода, влагомер, метод, водонефтяная смесь, микроволновые колебания, набег фаз.

Development of the microwave method for the high-precision measurement of the percentage of water in a water-oil mixture

I.B. Shirokov [1], I.I. Maronchuk [2]

[1] *FSAEE HE "Sevastopol State University," Universitetskaya St., 33, Sevastopol 299053, Russia, shirokov@ieee.org*

[2] *Genesis-Tavrida Ltd., Scherbak St., 5, Sevastopol, 299011, Russia, igimar@mail.ru*

Received 02.04.2018 y.; received in final form 09.04.2018 y.

Abstract

The paper describes a new method for determining the percentage of water in a water-oil mixture, based on the use of a microwave communication channel for performing phase-shift measurements with a simultaneous evaluation of the degree of absorption of the microwave signal in the test mixture.

Keywords: oil, oil products, water, moisture meter, method, water-oil mixture, microwave oscillations, phase incursion.

Введение

Россия является одним из лидирующих игроков на нефтяном мировом рынке, при этом, необходимо отметить, что нефтяная отрасль представляет собой основу развития не только отечественной, но и мировой экономики.

Добываемая «сырая» нефть является многокомпонентной смесью, состоящей из нефти, газа и воды, поэтому, наличие достоверной информации о содержании в ней нефти и воды позволяет судить об эффективности и рентабельности разработки при эксплуатации скважины и месторождения в целом [1]. Основными нефтепродуктами являются автомобильные бензины, дизельное топливо и моторные масла, в процессе транспортирования, приема, хранения и выдачи которых происходит их интенсивное обводнение и загрязнение с последующим ухудшением качества. Исходя их вышесказанного, контроль содержания воды в нефти и нефтепродуктах, с целью адекватной реакции на ликвидацию, связанных с ее наличием, негативных факторов является весьма актуальной задачей.

Для технологических процессов на всех этапах добычи, транспортировки и переработки углеводородного сырья важным является непрерывность измерения его влагосодержания, при этом в настоящее время используют поточные влагомеры, работающие, как правило, в ав-

томатическом режиме [2]. Методы, на которых базируется работа различных современных поточных средств измерений объемного влагосодержания нефти и нефтепродуктов, основаны на физико-химических свойствах воды и нефти. Классификация методов, согласно проведенному обзору литературы, показана в [1]. Одними из наиболее востребованных методов измерения влагосодержания нефти и нефтепродуктов являются СВЧ-методы, основанные на диэлектрических свойствах компонентов водонефтяной смеси [2, 3]. В данных методах измеряемым параметром, в основном, является затухание СВЧ энергии. По способу взаимодействия СВЧ-поля с эмульсией выделяют: метод отражения или метод свободного пространства, в котором исследуемый материал помещается между двумя антеннами; метод поглощения, который разделяют на: резонаторные, волноводные и зондовые методы. При этом используют в конструкции влагомеров, соответствующие датчики: волноводные, антенные и зондовые, которые могут быть источником их инструментальной погрешности [4].

Диэлектрическая проницаемость нефти сильно зависит от ее углеводородного состава, это приводит к большим погрешностям определения длины волны и коэффициента потерь в эмульсии во всем диапазоне СВЧ-частот [4].

В целом поточные СВЧ-влагомеры при работе в низко обводненных средах в диапазоне содержания воды 0 ÷ 5 % имеют предел допускаемой абсолютной погрешности ± 0,5 % [1, 2]. При увеличении содержания воды до 60 ÷ 80 % наблюдается обращение фаз в водонефтяной эмульсии, происходит резкое увеличение резонансной частоты, что связано с образованием эмульсии типа «нефть в воде» и переходом электромагнитного поля в пристеночную область. Дополнительная погрешность возрастает, сказываясь на метрологических характеристиках широкодиапазонных СВЧ-влагомеров [5].

Компания Agar Corporation, например, производит поточные влагомеры, принцип работы которых основан на поглощении микроволнового излучения водонефтяной эмульсией. Микроволновое излучение (частотой выше 1 ГГц) интенсивно поглощается полярными молекулами воды и в гораздо меньшей степени неполярными молекулами углеводородов, что позволяет определять воду в нефти при малых содержаниях с большой точностью, охватывая при этом весь диапазон (0 ÷ 100%), однако при высоких значениях содержания воды точность уменьшается. Преимуществом таких влагомеров является незначительное влияние на измерения химического (элементного) состава нефти, а к недостаткам, негативное влияние на результаты измерений изменение уровня содержания соли в пластовой воде [6].

В основном приборы на СВЧ-методах характеризуются следующими недостатками:

- имеют дополнительную погрешность от воздействия на контролируемую среду внешнего электрического поля;
- обладают возможностью электрического пробоя в измерительном датчике при большой влажности;
- возможно изменение мощности, потребляемой генератором вследствие изменения активной составляющей контролируемой среды;
- необходимостью компенсации одного из диэлектрических параметров (тангенса угла потерь или диэлектрической проницаемости) при определении другого параметра;
- достижением непрерывности диапазона измерений 0 ÷ 100 % по воде, путем компьютерной «сшивки» градуировочной кривой в области инверсии фаз; относительной дороговизной аппаратурного оформления.

Постановка задачи

Как видно, несмотря на имеющиеся преимущества, приборы измерения влагосодержания нефти на основе существующих СВЧ-методов, присутствующие сейчас на нефтяном рынке, имеют ряд качественных недостатков. Это требует современного, нестандартного подхода к усовершенствованию и новой реализации как самих СВЧ-методов, используемых в определении обводненности нефти и нефтепродуктов, так и приборов на их основе.

Целями работы являлись:

- разработка принципиально нового метода измерения содержания воды в нефти и нефтепродуктах в широком диапазоне, повышенной точностью с применением микроволнового канала связи для проведения измерений набега фазы и одновременной оценки степени поглощения микроволнового сигнала в смеси;
- разработка, изготовление и апробация аппаратурного опытного лабораторного варианта оформления метода.

Основы предлагаемого метода

Разработанный и предложенный ниже к

рассмотрению, и реализации СВЧ-метод качественно отличается от аналогов, присутствующих в настоящее время на нефтяном рынке, имея повышенную точность однозначного определения процентного содержания воды в низкообводненных средах [7].

Метод можно реализовать с помощью устройства, структурная схема которого показана на рис.1.

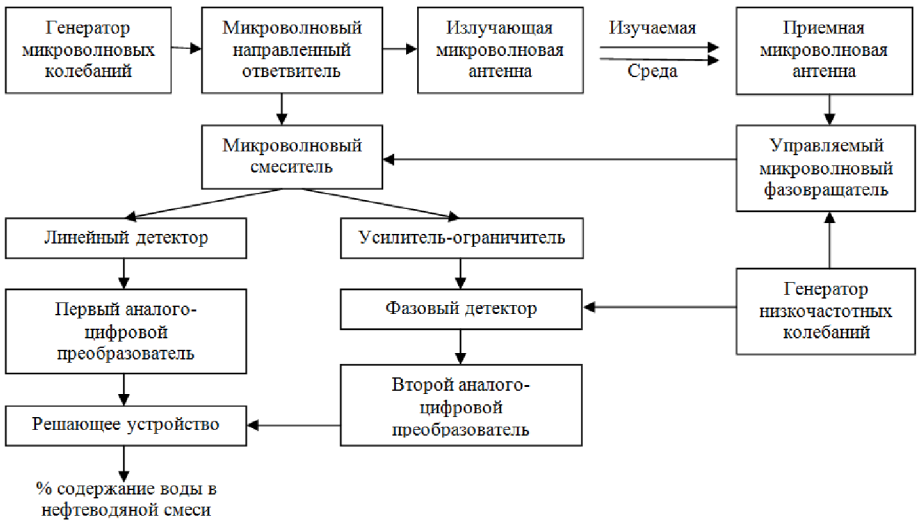


Рис. 1. Принципиальная схема разработанного прибора.

Прибор, собранный согласно структурной схемы, работает следующим образом.

Высокочастотный генератор микроволновых колебаний формирует гармонический сигнал:

$$u_0(t) = U_0 \sin(\omega t + \varphi_0), \qquad (1)$$

где U_0 — амплитуда;

ω — частота;

φ_0 — начальная фаза сигнала.

Данный сигнал, проходя через направленный ответвитель, излучается с помощью микроволновой антенны в измерительную камеру, в которой находится контролируемый нефтепродукт (изучаемая среда) и далее принимается такой же микроволновой антенной. Проходя через нефтепродукт, сигнал получает сдвиг фаз φ_x, зависящий от качества самого нефтепродукта и от содержаний в нем воды. Далее сигнал попадает на управляемый микроволновый фазовращатель, где формируется монотонно нарастающий или монотонно убывающий сдвиг фаз микроволновых колебаний. Монотонное изменение фазового сдвига на величину 2π в течение времени T эквивалентно сдвигу по частоте колебаний на величину

$$\Omega = \frac{2\pi}{T}. \qquad (2)$$

В результате микроволновый сигнал на выходе управляемого фазовращателя описывается следующим выражением

$$u_1(t) = k_1 U_0 \sin\left[(\omega + \Omega)t + \varphi_0 + \varphi_x + \varphi_{нч}\right], \qquad (3)$$

где $\varphi_{нч}$ — начальная фаза низкочастотного сигнала управления фазовращателем,

k_1 — некоторый коэффициент пропорциональности, учитывающий амплитудные характеристики всех звеньев.

Данный сигнал попадает на смеситель, куда также поступает через направленный ответвитель исходный сигнал с микроволнового генератора. В смесителе происходит перемножение этих сигналов, в результате чего происходит гомодинное преобразование частоты:

$$\begin{aligned} u_{см}(t) &= kU_0 \sin\left[(\omega + \Omega)t + \varphi_0 + \varphi_x + \varphi_{нч}\right] \times \\ &\times U_0 \sin(\omega t + \varphi_0) = \\ &= \frac{kU_0^2}{2}\left\{\cos\left[\Omega t + \varphi_x + \varphi_{нч}\right] - \right. \\ &\left. - \cos\left[(2\omega + \Omega)t + 2\varphi_0 + \varphi_x + \varphi_{нч}\right]\right\} \end{aligned}, \qquad (4)$$

где k — некоторый обобщающий коэффициент пропорциональности, учитывающий коэффициенты передачи всех звеньев измерительной установки и контролируемого нефтепродукта.

Составляющая с удвоенной несущей частотой является побочным продуктом преобразования и подавляется. На выходе смесителя выделяется только низкочастотный гармонический

сигнал частотой Ω, который содержит информацию о вносимом нефтепродуктом фазовом сдвиге и не содержит начальной фазы исходных микроволновых колебаний. Далее, выделенный и усиленный низкочастотный сигнал ограничивается по амплитуде в усилителе-ограничителе и подается на вход фазового детектора, на выходе которого получается сигнал, пропорциональный набегу фазы микроволнового сигнала, в пределах одного фазового цикла, при его прохождении через контролируемую водонефтяную смесь.

Измеренная разность фаз в пределах одного фазового цикла подается на второй аналого-цифровой преобразователь и получается цифровой код, отображающий точное значение разности фаз в пределах одного фазового цикла. Число разрядов двоичного кода выбирается максимально возможное. Данный код вводится далее в решающее устройство.

Параллельно низкочастотный сигнал с выхода микроволнового смесителя выпрямляется линейным детектором и на его выходе получается сигнал постоянного тока, пропорциональный коэффициенту ослабления микроволновых колебаний в толще пробы контролируемой смеси. Этот сигнал оцифровывается с помощью первого аналого-цифрового преобразователя.

При этом процесс преобразования служит не для точного измерения величины ослабления микроволнового сигнала в толще контролируемой смеси, а для грубой оценки процентного содержания воды в ней. Чем больше воды в смеси, тем больше затухание микроволнового сигнала, при этом число получаемых разрядов мало. Этот код вводится в решающее устройство, в котором по значению этого кода, с учетом известного расстояния между антеннами, определяется число фазовых циклов набега фазы микроволнового сигнала при его распространении через толщу контролируемой смеси.

В решающем устройстве полученное число фазовых циклов в виде соответствующего числа разрядов двоичного кода добавляется в качестве старших разрядов к полученному двоичному коду, отображающему точное значение разности фаз низкочастотных колебаний в пределах одного фазового цикла. После чего, зная толщину слоя контролируемой смеси, однозначно и с высокой точностью определяется относительная диэлектрическую проницаемость ε исследуемой смеси. По полученному значению относительной диэлектрической проницаемости смеси однозначно и с высокой точностью определяется процентное содержание воды в смеси в широком диапазоне, по технике, описанной в [1].

Измерение разности фаз сигналов производится при этом на низких частотах, получаемых после гомодинного преобразования частоты микроволновых сигналов.Использование низких частот для измерения разности фаз позволяет получить высокую точность измерений. Для организации гомодинного преобразования частот сигналов один из микроволновых сигналов получается путем монотонного сдвига фазы исходного микроволнового сигнала с определенной скоростью.

Эксперимент

По описанной выше структурной схеме была собрана пробная опытная лабораторная установка. Измерительная камера которой заполнялась нефтепродуктом с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3 \div 4$ без учета нахождения нем воды. Добавление в нефтепродукт воды увеличивает значение интегральной диэлектрической проницаемости смеси.

Согласно известным правилам, любой прямоугольный волновод, заполненный диэлектриком, имеет критическую длину волны, определяемую как

$$\lambda_{кр} = 2a\sqrt{\varepsilon},$$

где a — размер широкой стенки волновода.

При этом рабочая длина волны измерительной камеры должна быть меньше критической дины волны. В нашем случае выбрали $a = 80$ мм. Соответственно рабочая частота измерительной камеры с выбранными размерами 80 мм × 80 мм должна быть не менее чем

$$f > \frac{c}{\lambda_{кр}} = \frac{c}{2a\sqrt{\varepsilon}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 0{,}08\sqrt{3}} = 1{,}09 \text{ ГГц}.$$

При испытаниях использовали конкретное значение рабочей частоты $f = 1{,}3$ ГГц.

Для этой рабочей частоты осуществлена разработка и изготовление микроволновых антенн, встроенных в измерительную камеру.

В качестве антенн измерительной камеры было принято решение использовать микрополосковые излучающие структуры. Данный тип антенн предполагает наличие экранирующей поверхности, в качестве которой можно использовать металлические стенки измерительной камеры. При этом антенна способна эффективно излучать электромагнитную волну внутрь измерительной камеры. При этом конструкция микрополосковой антенны не создает дополнительных проблем с герметизаций измерительной камеры, работающей под высоким давлени-

ем. Микрополосковая антенна представляет собой прямоугольную площадку, размещенную на диэлектрической подложке из стандартного материала FR-4.

Настройку, калибровку и опытное тестирование установки осуществляли на имеющихся в наличии образцах «сырой» нефти Кунгурского месторождения (Нефть (2.2.1.2) по ГОСТ Р 51858-2002 «Нефть. Общие технические условия.»). При калибровке оборудования условно было принято считать содержание массовой доли воды в имеющихся образцах — 0,5 % (в соответствии с ГОСТ Р 51858-2002). Измерения содержания воды в образцах, помещенных в стеклянную химическую посуду, проводились при температуре 25 °С, используя для термостатирования смесей жидкостной термостат марки ВТ-8. При расчетах использовались значения диэлектрической проницаемости для нефти — 2,1, для воды — 80. При проведении серии измерений на трех подготовленных пробных пробах «сырой» нефти был получен адекватный результат с хорошей совместимостью при усредненной основной погрешности ± 0,08 %.

В связи с тем, что разработка в развитие планируется для создания проточного влагомера, для дальнейшей апробации прибора и метода использовали растворы водонефтяных эмульсий с массовой концентрацией воды 10, 20 и 30 %. Подготовлено по три пробы каждой концентрации, для пятикратного измерения. Для приготовления растворов применялась имеющаяся «сырая» нефть и водопроводная вода, при этом учитывалось принятое содержание воды в исходной нефти 0,5 %. Растворы готовились путем обычного смешения по методике, описанной в [8]. Проведенные эксперименты показали плохую совместимость полученных результатов, что вызвано: необходимостью доработки опытного оборудования и аппаратурного оформления измерительных процессов; неправильным выбором обводненности исходной «сырой» нефти (необходима калибровка оборудования по эталонному образцу, либо проверка измерений по трем методам); неравномерным распределением глобул воды в образцах (вызванное подготовкой образцов к измерениям) необходимостью доработки методик подготовки к процессам измерения, проведению процессов измерения и подготовки образцов к измерению для данного метода и его аппаратурного оформления.

Однако при усреднении результатов измерений по концентрациям растворов в пробах были сделаны следующие выводы для водонефтяной смеси:

— 10 % усредненная основная погрешность составила ± 0,35 %;

— 20 % усредненная основная погрешность составила ± 0,28 %;

— 30% усредненная основная погрешность составила ± 0,45 %.

Представленные на российском рынке влагомеры, использующие в своей работе различные методы, должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 8.661-2009 [9], и иметь ниже следующие метрологические характеристики для измерения объемного влагосодержания нефти при добыче, подготовке и транспортировании для диапазонов измерений содержания воды:

— 0 ÷ 2 % предел допускаемой основной погрешности ± 0,06 %;

— 2 ÷ 10% предел допускаемой основной погрешности ± 0,15 %;

— 10 ÷ 20 % предел допускаемой основной погрешности ± 0,2 %;

— 20 ÷ 70 % предел допускаемой основной погрешности ± 1 %;

— 70 ÷ 100 % предел допускаемой основной погрешности ± 1,5 %.

Таким образом, исходя их вышеприведенных данных видно, что представленный в статье метод имеет оригинальное решение, а опытный, недорогой прибор, созданный на его основе, имеет конкурентоспособные характеристики, дающие возможность при устранении вышеописанных недостатков, выводу и использованию его на мировом нефтяном рынке.

Заключение

Разработан и предложен к использованию новый метод определения процентного содержания воды в водонефтяной смеси.

Метод основан на применении микроволнового канала связи для проведения измерений набега фазы с одновременной оценкой степени поглощения микроволнового сигнала в исследуемой смеси. По произведенной оценке степени поглощения сигнала грубо определяется процентное содержание воды в смеси, что дает возможность определить число фазовых циклов набега фазы микроволнового сигнала и определить тем самым точное значение набега фазы или точно и однозначно определить процентное содержание воды в смеси.

На основе предложенного метода разработана структурная схема устройства и рассмотрены теоретические возможности его работы.

Разработана, собрана и апробирована проб-

ная опытная лабораторная установка измерения объемного процентного содержания воды в водонефтяной смеси, на основе рассматриваемого метода. Проведены опытные исследования на содержания воды водонефтяных смесей с массовой концентрацией воды 0,5 10, 20 и 30 %.

Усредненная основная погрешность измерений при этом составила ± 0,08, ± 0,35, ± 0,28 и ± 0,45 % соответственно.

В дальнейшем, кроме устранения описанных выявленных недостатков, планируется разработка проточного прибора измерения объемного влагосодержания нефти и нефтепродуктов на основе вышеуказанного метода со значительным усовершенствованием аппаратурного оформления и его программного обеспечения.

Увеличением возможностей использования прибора в критических условиях работы в широком диапазоне рабочих сред (температуры и давления), увеличении диапазона измерения содержания воды (до 100 %) и основных метрологических характеристик.

Список литературы

1. Широков И.Б. Методы определения водосодержания в нефти и нефтепродуктах, остаточного содержания нефтепродуктов в воде / И.Б. Широков, И.И. Марончук // Энергетические установки и технологии. — 2017. — Т.3. — № 4. — С.16—31.
2. Широков И.Б. Приборы, применяемые для определения содержания воды в нефти и нефтепродуктах (обзор) / И.Б. Широков, И.И. Марончук // Энергетические установки и технологии. — 2018. — Т. 4. — № 1. — С. 56—73.
3. Бензарь В. К. Техника СВЧ-влагометрии / В.К. Бензарь.—Минск: Высшая школа, 1974.—352 с.
4. Вороненко А.В. Погрешность измерения влагосодержания нефти в СВЧ диапазоне / А.В. Вороненко, В.В. Аверин, Д.Е. Ушаткин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2014. — № 5. — С. 10—19.
5. Сладовский А.Г. Совершенствование методов и средств воспроизведения и передачи единицы объемного влагосодержания нефти и нефтепродуктов: Дис. канд. техн. наук / Сладовский Анатолий Геннадьевич. — Казань, 2017. — 178 с.
6. Гончаров А.А. Методы определения обводненности сырой нефти: отечественный и зарубежный опыт / А.А. Гончаров, В.М. Полторацкий, М.А. Слепян // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2008. — №4. — С.54—57.
7. Пат. 2594338 Российская Федерация G01N 22/00, G01F 13/00 Способ определения процентного содержания воды в смеси диэлектрик-вода при изменении содержания воды в смеси в широких пределах / Широков И.Б. Патентообладатель: Широков И.Б. № 2016114471/93; заявл. 13.04.2016; опубл. 10.08.2016 Бюл. № 22. — 8 с.
8. Охлопков А.С. Свойства товарной сырой нефти, позволяющие идентифицировать источник нефтяного загрязнения окружающей природной среды: Дис. канд. хим. наук / Охлопков Алексей Сергеевич. — Нижний Новгород, 2015. — 130 с.
9. ГОСТ Р 8.661-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Влагомеры нефти. Нормируемые метрологические характеристики. — М.: Стандартинформ, 2010. — 4 с.

References

1. Shirokov I.B. Methods for determination of water content in petroleum and petroleum products, residual oil products in water / I.B. Shirokov, II. Maronchuk // Energy Installations and Technologies. — 2017. — - T.3. — № 4. — C.16— 31.
2. Shirokov I.B. Instruments used to determine the water content in oil and petroleum products (review) / I.B. Shirokov, I.I. Maronchuk // Power plants and technologies. — 2018. — T. 4. — No. 1. — P. 56— 73.
3. VK Benzar 'The technique of microwave moisture meter / V.K. Benzar.-Minsk: High School, 1974. — 352 p.
4. Voronenko A.V. The error in measuring the moisture content of oil in the microwave range / A.V. Voronenko, V.V. Averin, D.E. Ushatkin // Automation, telemechanization and communication in the oil industry. — 2014. — No. 5. — P. 10— 19.
5. Sladovsky A.G. Perfection of methods and means of reproduction and transfer of a unit of volumetric moisture content of oil and oil products: Dis. Cand. tech. Sciences / Sladovskiy Anatoliy Gennadievich. — Kazan, 2017. — 178 p.
6. Goncharov A.A. Methods for determining the watercut of crude oil: domestic and foreign experience / A.A. Goncharov, V.M. Poltoratsky, M.A. Slepyan // Automation, telemechanization and communication in the oil industry, 2008. — №4. — P.54—57.
7. Pat. 2594338 Russian Federation G01N 22/00, G01F 13/00 A method for determining the percentage content of water in a dielectric-water mixture when the water content of a mixture varies over a wide range / Shirokov I.B. Patent Attorney: Shirokov I.B. No. 2016114471/93; appl. 13/04/2016; publ. 08/10/2016 Bul. № 22. — 8 p.
8. Okhlopkov A.S. Properties of commercial crude oil, which allow to identify the source of oil pollution of the environment: Dis. Cand. chem. Sciences / Okhlopkov Alexey Sergeevich. — Nizhny Novgorod, 2015. — 130 p.
9. GOST R 8.661-2009. State system for ensuring the uniformity of measurements. Hydrometers of oil. Normalized metrological characteristics. — Moscow: Standartinform, 2010. — 4 p.

УДК 621.325

Разработка элементов конструкции измерителя влаги в нефти и нефтепродуктах на основе СВЧ метода

И. Б. Широков [1], Н.И. Черкашина [2], И.И. Марончук [3]
[1,2]*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул.Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]shirokov@ieee.org, [2]selyanskij-as@yandex.ru*
[3]*ООО «Генезис-Таврида», ул.Щербака, 5, г.Севастополь, 299011, Россия, igimar@mail.ru*

Статья поступила 25.04.2018 г.; после доработки 28.04.2018 г.

Аннотация
В работе рассматриваются результаты исследований по обоснованию условий эксплуатации, разработке и изготовлению конструкции опытного образца измерительной камеры прибора для исследования содержания воды в нефти и нефтепродуктах СВЧ методом.

Ключевые слова: нефть, нефтепродукты, вода, влагомер, моделирование, измерительная камера.

Development of the elements of the moisture meter in oil and oil products based on the microwave method

I.B. Shirokov [1], N.I. Cherkashina [2], I.I. Maronchuk [3]
[1,2] *FSAEE HE "Sevastopol State University," Universitetskaya St., 33, Sevastopol 299053, Russia, [1]shirokov@ieee.org, [2]selyanskij-as@yandex.ru*
[3] *Genesis-Tavrida Ltd., Scherbak St., 5, Sevastopol, 299011, Russia, igimar@mail.ru*

Received 25.04.2018 y.; received in final form 28.04.2018 y.

Abstract
The paper examines the results of studies on the substantiation of operating conditions, development and fabrication of a prototype construction of a measuring chamber of a device for studying the water content in oil and oil products using a microwave method.

Keywords: oil, oil products, water, moisture meter, modelling, measuring chamber.

Введение

Современная нефтяная отрасль является основой развития всей мировой экономики. По объему и добыче нефти Россия занимает одно из лидирующих мест в мире, являясь нефтедобывающим, перерабатывающим, потребляющим и экспортирующим нефть государством.

Добываемая «сырая» нефть представляет собой многокомпонентную смесь, состоящую из нефти, газа и воды, причем уровень наличия воды, в старых месторождениях, может достигать до 90%. Наличие достоверной информации о содержании нефти и воды в добываемой продукции позволяет судить об эффективности и рентабельности разработки и эксплуатации месторождений. Кроме того, на добычу воды в составе нефти, на её отделение и утилизацию затрачиваются значительные средства.

Основными нефтепродуктами, получаемыми из добываемой нефти, являются автомобильные бензины, дизельное топливо и моторные масла. В процессе транспортирования, приема, хранения и выдачи которых происходит их интенсивное обводнение и загрязнение с последующим ухудшением качества.

Поэтому, проблема, связанная с адекватным определением количества обводненности нефти и нефтепродуктов, в процессе добычи транспортировки и переработки с целью точного опреде-

ления количества «товарной» нефти, а также четкое определение содержания воды в нефтепродуктах в соответствии с ГОСТ Р 8.615-2005 и с ГОСТ Р 8.595-2004, является весьма актуальной задачей [1, 2]. При этом практика показывает, что в реальном производстве необходимо не только использование высокоточных средств измерения в лабораторных условиях, но и постоянный мониторинг изменения содержания воды на всех технологических этапах производства в нефтяной отрасли.

В предыдущих работах авторов [3, 4] показано, что существует довольно существенное многообразие методов и выпускается огромный ассортимент влагомеров на их основе. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки и соответственно занимает свою нишу в применении при коммерческом учете в системах измерений количества и качества нефти и нефтепродуктов при добыче, транспортировании, переработке, использовании и хранении нефтепродуктов. При этом любой из этих методов имеет свои особенности аппаратурного оформления и соответственно программного обеспечения, они могут различаться условиями рабочей среды и спецификой технологических процессов, диапазоном измерения влагосодержания и основными метрологическими характеристиками.

Постановка задачи

Как видно из введения, разработка высокоточного недорогого прибора измерения содержания воды в широком диапазоне в нефти и нефтепродуктах при различных стадиях технологических процессов нефтяной отрасли является весьма актуальной задачей.

В настоящее время авторами проводятся работы по разработке и приборной реализации нового СВЧ метода измерения содержания воды в нефти и нефтепродуктах. На данном этапе создания влагомера, с целью отладки разработанного метода и его электронного оформления, а так же разработки и отработки методик измерения возникла необходимость создания опытного образца прибора. Для этих целей требуется решение задач связанных с необходимостью аргументированного расчета при разработке и изготовлении элементов конструкции измерительной камеры опытного прибора, с выбором материалов обладающих нужными свойствами, учитывающими особенности его эксплуатации. Также необходимо учитывать особенности нормативной документации действующей в настоящее время в РФ, в области добычи, переработки и характеризации свойств добываемой нефти и получаемых на ее основе нефтепродуктов.

Целью работы являлось проведение исследований по обоснованию условий эксплуатации и разработки конструкции опытного образца измерительной камеры прибора для исследования содержания воды в нефти и нефтепродуктах. При этом осуществлялся аргументированный выбор материалов и расчет элементов конструкции прибора, производимый с помощью стандартных методик. При оценивании прочности элементов конструкции использовался программный продукт SOLIDWORKS Simulation.

Обоснование (выбор) условий эксплуатации опытного образца измерительной камеры прибора и материалов для изготовления его конструкций, их расчет

Разрабатываемый и создаваемый прибор планируется к поточному измерению влагосодержания нефти и нефтепродуктов в широком диапазоне наличия воды (от 0 до 30 % об. содержания воды) при использовании на нефтебазах при: сдаче исследуемого продукта нефтедобывающими предприятиями и транспортировании нефтепродуктов потребителям посредством нефтепроводного транспорта с использованием технологических трубопроводов. Известно, что технологические трубопроводы работают в разнообразных, порой критических условиях, находятся под воздействием высоких давлений и широких диапазонов температур, подвергаются коррозионным воздействиям. Вышеуказанные аспекты требуют повышенного внимания к надежности эксплуатируемых систем, которые в значительной мере зависят от правильного выбора материалов конструкций разрабатываемых изделий и качественного изготовления их элементов.

Материалы, выбираемые для изготовления влагомера, должны обеспечить его надежную работу в течение расчетного срока службы с учетом заданных условий эксплуатации (расчетное давление, минимальная отрицательная и максимальная расчетная температуры), состава и характера измеряемой среды (коррозионная активность, взрывоопасность, токсичность и др.), влияния температуры и влажности окружающего воздуха.

Согласно действующим нормативным документам [5-7], при расчете элементов конструкции измерительной камеры влагомера было условно предположено, что его испытание, доработка и техническая эксплуатация будет проходить на нефтепроводах, мазутопроводах, маслопроводах, бензопроводах, а также трубопро-

водах специального назначения (густого и жидкого смазочного материала) эксплуатируемых при расчетном давлении P до 6,3 МПа и температурах не более 200 °С. Таким образом, изделие будет функционировать в системе относящейся к горячим трубопроводам работающим при высоком давлении и транспортировке среднеагрессивных сред, при эксплуатации, как во внутрицеховом варианте, так и на открытых площадках. Согласно классификации представленной в [8,9], обозначение трубопровода в котором планируется применение разрабатываемого изделия можно выделить как «трубопровод II группа Б (в)». Это обозначает, что по трубопроводу транспортируется среда группы Б (в) (горючие жидкости) с параметрами категории II (P = 2,5 ÷ 6,3 МПа и T до 350 °С).

Исходя из вышесказанного, согласно ГОСТ 32569-2013 [6], материалом для изготовления корпуса измерительной камеры разрабатываемого влагомера выбрана сталь марки 12Х18Н10Т, выпускаемая в соответствии с ГОСТ 5632-2014 [10], а также трубы на ее основе изготовляемые в соответствии с ГОСТ 9940-81 и ГОСТ 9941-81 [11,12]. Исходя из описания данного материала (стали) по ГОСТ 32569-2013 [6], изделия из него пригодны для транспортировки различных сред с максимальным давлением до 40 МПа в диапазоне температур от –253 до 700°С.

При первичном расчете, условный проход D_y трубы, на основе которой планировалось изготовление измерительной камеры влагомера, выбран равным 100 мм.

Тогда размер внутреннего профиля технологического измерительного канала расположенного в центральной части камеры перпендикулярно потоку движения исследуемой водонефтяной эмульсии составит 80 × 80 мм. При этом измерительная камера заполняется нефтепродуктом с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 3 \div 4$ без учета нахождения нем воды. Добавление в нефтепродукт воды увеличивает значение интегральной диэлектрической проницаемости смеси. Возьмем худший вариант, приняв $\varepsilon = 3$.

Тогда, согласно известным правилам, любой прямоугольный волновод, заполненный диэлектриком, имеет критическую длину волны, определяемую как

$$\lambda_{кр} = 2a\sqrt{\varepsilon},$$

где a — размер широкой стенки волновода. При этом рабочая длина волны измерительной камеры должна быть меньше критической дины волны. В нашем случае $a = 80$ мм. Соответственно рабочая частота измерительной камеры с выбранными размерами 80 × 80 мм должна быть не менее чем

$$f > \frac{c}{\lambda_{кр}} = \frac{c}{2a\sqrt{\varepsilon}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 0{,}08\sqrt{3}} = 1{,}09 \text{ ГГц}.$$

Выберем конкретное значение рабочей частоты $f = 1{,}3$ ГГц. Для этой рабочей частоты в дальнейшем будет осуществлена разработка микроволновых антенн, встраиваемых в измерительную камеру.

Толщина стенки трубы выбранного диаметра определялась по формуле, представленной в ГОСТ 32388—2013 [9, 13]:

$$S_R = \frac{|p| D_a}{2\varphi_y [\sigma] + |p|}$$

где, p — расчетное внутреннее давление (МПа),

D_a — внутренний диаметр трубы (мм),

σ — допускаемое напряжение при расчетной температуре (МПа),

φ_y — коэффициент прочности продольного сварного шва.

При расчете приняли:

D_a = 100 мм, p = 6,3 МПа, σ = 160 МПа (для стали 12Х18Н10Т при Т = 200°С), φ_y = 0,65 (с учетом сваренного измерительного канала).

В результате расчета толщина стенки составила 3,1 мм.

Обычно расчетная толщина стенки, полученная по представленной формуле, как правило, меньше минимальной толщины выпускаемых заводом-производителем труб такого диаметра. Поэтому, в реальной жизни, расчет трубопровода на прочность обычно не производится, диаметр трубопровода определяется из гидравлического расчета, а толщина стенки принимается минимальной для данного диаметра. Однако необходимо учитывать, что при изготовлении измерительной камеры влагомера в нашей трубной заготовке с целью создания технологического измерительного канала вырезаются два сегмента размером 80 × 80 мм которые расположены друг напротив друга при этом дополнительно свариваются элементы конструкции канала, что приводит к ухудшению механической прочности заготовки.

Учитывая это, выбрана труба согласно ГОСТ 9940-81, изготовленная из стали 12Х18Н10Т, имеющая внешний диаметр 102 мм с большей, чем расчетная, толщиной стенки — 6 мм.

Сегменты для изготовления технологического измерительного канала сварены из листа стали 12Х18Н10Т толщиной 10 мм. Толщина

плоской фланцевой заглушки рассчитана по формуле, согласно ГОСТ 32388—2013 [9, 14]:

$$S_{R3} = 0,5 D_b \sqrt{\frac{|p|}{[\sigma]}}$$

где, p — расчетное внутреннее давление (МПа),

D_b — диаметр посадки крепежных болтов (мм),

σ — допускаемое напряжение при расчетной температуре (МПа).

Принимаем: D_b = 120 мм, p = 6,3 МПа, σ = = 160 МПа (для стали 12Х18Н10Т при Т = 200 °С).

Согласно расчету толщина плоской фланцевой заглушки измерительного канала составляет 11 мм.

Таким образом, толщина и самого фланца должна быть не менее 11 мм. Однако, согласно рис. 1 под фланцевой заглушкой (1), скрепляемой с фланцем (2) приваренным к стенкам измерительного канала (4) располагается пластина из стеклотекстолита (2) толщиной 10 мм с помещенной там кроме того микрополосковой антенной, которые не учитывались в расчетах.

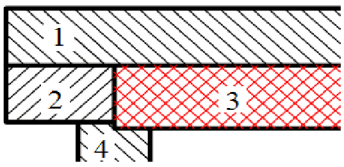


Рис. 1. Эскиз-разрез соединения фланцевой заглушки с фланцем и антенной в технологическом измерительном канале. 1 – фланцевая заглушка, 2 – фланец, 3 – пластина из стеклотекстолита с встроенной антенной, 4 – стенка измерительного канала.

Поэтому, при изготовлении реального прибора фланцевая заглушка (1) и фланец (2) были выбраны толщиной 9 мм.

Оценка такой конструкции с помощью математического моделирования проведена и описана ниже.

Необходимо также отметить наличие технологического отверстия в центре фланцевой заглушки, служащее для установки разъема для возбуждения антенны.

Согласно [15,16] рассчитано болтовое соединение фланцевой заглушки с фланцем, при расчетах принято:

P = 6,3 МПа; линейный размер технологического измерительного канала h = 80 мм;

число крепежных болтов z = 16, материал болтов — сталь 14Х17Н2, допускаемое напряжение болтов при 200 °С σ_τ = 287 МПа, коэффициент запаса прочности n = 1,5.

Расчет показал, что фланцевая заглушка может крепиться к фланцу 16 болтами М6 изготовленными из стали 14Х17Н2.

Соединение измерительной камеры влагомера с арматурой или технологическим трубопроводом планируется за счет разъемных фланцевых соединений, приваренных к корпусу камеры и состоящих из фланцев, прокладки и соединительных болтов с гайками. Герметичность соединения достигается за счет прокладок из упругого материала, установленных между торцовыми поверхностями фланцев. Фланцы, количество и размер соединительных болтов к ним определялись исходя из ГОСТ 12821-80 [17], для условного прохода D_y = 100 мм и условного давления Py = 6,3 МПа и приобретались, как готовое изделие. Материал фланца — сталь 12Х18Н10Т.

На рис. 2. показан изготовленный опытный вариант измерительной камеры СВЧ влагомера нефти и нефтепродуктов на основе разработанной и обоснованной выше конструкции.

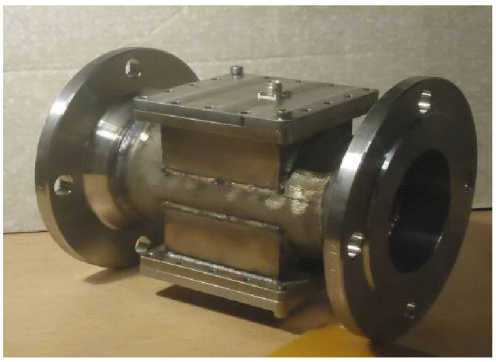


Рис. 2. Опытный образец измерительной камеры СВЧ влагомера нефти и нефтепродуктов.

Проверка выбранных (рассчитанных) параметров элементов конструкции опытного образца измерительной камеры прибора с использованием программы SOLIDWORKS Simulation

С целью проверки разработанной конструкции на прочность при заданных условиях эксплуатации были проведены ее исследования, с помощью математического моделирования используя программный продукт SOLIDWORKS Simulation.

При моделировании приняты условия, что все детали конструкции имеют сварные соединения, не имея упругих прокладок, что уменьшает прочность конструкции при ее исследовании. Расчеты осуществлялись при температурах 20 °С и 100 °С, используя для нагрузки максимальное давление в 6,3 МПа, при этом проводились, как статические исследования, так и исследования на усталость при

1000 циклах, оптимально характеризующие надежность элементов конструкции разработанного СВЧ влагомера.

Выбранная программа осуществляет расчеты на основе анализа конечных элементов, что обеспечивает, надежность численного метода анализа разработанной конструкции.

Процесс расчета начинается с разработки и прорисовки чертежа модели, который программа делит на небольшие сегменты простой формы (элементы), соединенные в общих точках (узлах).

Программа анализа конечных элементов рассматривает модель как сеть дискретных связанных между собой элементов.

Метод конечных элементов прогнозирует поведение модели при помощи сопоставления информации, полученной от всех составляющих ее элементов.

Выбор сетки для расчетов параметров конструкции влагомера в программе SOLIDWORKS Simulation

Качественное создание сетки для расчета параметров изделия в программе SOLIDWORKS Simulation — один из основных этапов в анализе конструкции разработанного прибора.

Программа создает сетку автоматически, на основе глобального размера элемента, допуска и характеристик локального управления сеткой.

Программа определяет размер элемента для модели, принимая во внимание ее объем, площадь поверхности и другие геометрические характеристики.

Размер создаваемой сетки (количество узлов и элементов) зависит от геометрии и размеров модели, допуска сетки, параметров управления сеткой и характеристик контакта. На ранних стадиях анализа конструкций, где могут подойти приблизительные результаты, можно задать больший размер элемента для более быстрого решения.

Для более точного решения может потребоваться меньший размер элемента.

В расчетах применен тип сетки — сетка на твердом теле, используемое разбиение — сетка на основе кривизны, при этом эпюра качества сетки — высокая.

Пример созданной программой SOLIDWORKS Simulation сетки для расчетов параметров изделия на основе разработанной нами конструкции СВЧ влагомера нефти и нефтепродуктов с заглушенными фланцами показан на рис. 3.

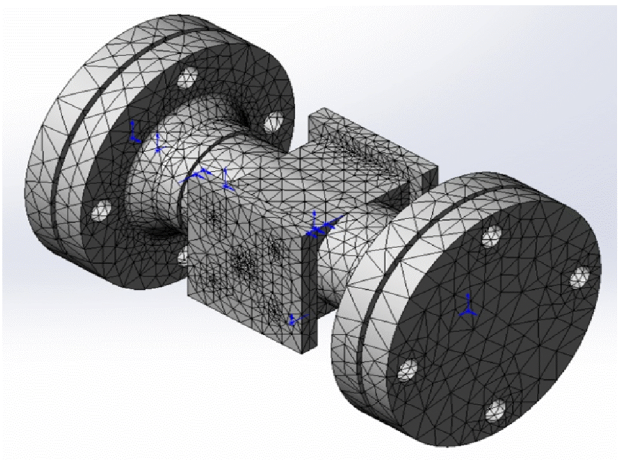


Рис. 3. Сетка для расчетов параметров изделия в программе SOLIDWORKS Simulation на основе разработанной конструкции измерительной камеры СВЧ влагомера нефти и нефтепродуктов с заглушенными фланцами.

Полученная сетка включает 141787 узлов при наличии 95093 элементов.

Проведение статических исследований конструкции измерительной камеры влагомера в программе SOLIDWORKS Simulation

Известно, что когда к твердому телу применяются нагрузки, оно деформируется, и действие приложенных нагрузок передается через весь его объем.

Внешние нагрузки включают в себя внутренние силы и реакции, которые компенсируют их воздействие и возвращают тело в состояние равновесия.

Поэтому, в первую очередь, проводились статические исследования конструкции, которые вычисляли перемещения, силы реакции, нагрузки, напряжения и распределение запаса прочности.

Известно, что материал разрушается в месте, где нагрузки превышают определенный уровень, поэтому вычисление запаса прочности базируется на критериях разрушения. Анализ расчета таких критериев рассмотрен ниже.

На рис. 4 показан расчет эпюр одного из критериев оценки прочности разработанной конструкции — статическое или результирующее перемещение (URES) выраженное в миллиметрах. Данный рисунок демонстрирует расположение расчетных эпюр при температуре 100°С и давлении 6,3 МПа.

Из рисунка видно, что минимальное результирующее перемещение составляет 0,00 мм, а

максимальное 0,180 мм (в месте сварки трубы с противоположными сегментами технологического измерительного канала).При этом же давлении и комнатной температуре имеем максимальное результирующее перемещение в том же расчетном узле равное 0,155 мм, что незначительно отличается от температурного варианта.

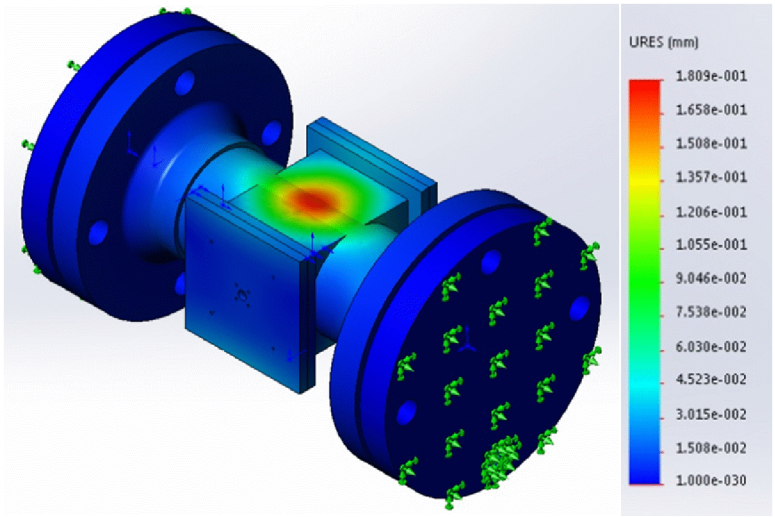


Рис. 4. Эпюры результирующего перемещения при параметрах расчета: *Py* = 6,3 МПа, T=100°C.

Вторым, рассматриваемым определяющим критерием является эквивалентная деформация (ESTRN).

Эпюры с этим критерием не представлены ввиду их малой информативности, вызванной незначительными (некритичными для конструкции) значениями. При температуре 20°C минимальная эквивалентная деформация в изделии составила $4{,}23\times10^{-8}$, а максимальная в месте сварки трубы с противоположными сегментами технологического измерительного канала не превысила $1{,}0\times10^{-2}$, при 100°C эти величины составляли $1{,}88\times10^{-7}$ и $1{,}28\times10^{-2}$ соответственно. При этом видно, что значения немного меняются, что связано с температурной пластической деформацией, присутствующей в температурном варианте.

Следующим объективным критерием оценки прочности являются действие различных напряжений на элементы конструкции разрабатываемого изделия. Компоненты данных напряжений в значительной мере зависят от направлений, в которых они прикладываются и, исходя из этого, рассчитываются. Для некоторых поворотов координатных осей касательные напряжения исчезают. Остающиеся три компоненты нормальных напряжений называют главными напряжениями. Направления, связанные с главными напряжениями, называют главными направлениями.Приведенное ниже в расчетах напряжение по Мизесу, в отличие от рассмотренных выше напряжений, не имеет направления, и полностью определяется величиной, выраженной в единицах напряжения. Напряжение по Мизесу является критерием оценки пластичности материалов. В случае его численного превышения относительно предела текучести исследуемого материала становится очевидным факт разрушения данного материала и отказа от его использования при текущих условиях эксплуатации.

На рис. 5 представлена эпюра статистического анализа напряжения по Мизесу при шкале деформации увеличенной в 227,7 раза, для наглядности.

Как для температуры 20°C, так и для 100°C максимальные эпюры напряжений по Мизесу находятся в месте сварки трубы с противоположными сегментами технологического измерительного канала и составляет $5{,}28\times10^{1}$ Н/мм^2 и $1{,}19\times10^{2}$ Н/мм^2 соответственно.

Минимальные же эпюры напряжений по Мизесу на данной конструкции влагомера составляют $7{,}0\times10^{-3}$ Н/мм^2 и $2{,}11\times10^{-2}$ Н/мм^2 соответственно.

Исходя из справочных данных, предел текучести используемой в расчетах хромистой нержавеющей стали составляет $1{,}72339\times10^{2}$ Н/мм^2. Таким образом, расчет напряжения по Мизесу показывает возможность использования данной конструкции для заявленных целей, правда с не очень большим запасом прочности.

На рис. 5 также представлены эпюры де-

формирования формы конструкции, демонстрирующие качественное направление эпюр деформации изделия при приложенном давлении и температуре.

Проведение исследований усталостных характеристик конструкции влагомера в программе SOLIDWORKS Simulation

Следующим этапом исследования с использованием программного продукта SOLIDWORKS Simulation были расчеты на усталость материалов конструкции разрабатываемого прибора.

Усталость материалов является одной из основных причин выхода из строя основного количества эксплуатируемых человеком изделий, изготовленных из разных материалов, в том числе и из металлов. При эксплуатации изделия повторяющиеся операции приложенной к нему нагрузки и разгрузки со временем приводят к ослаблению его элементов конструкций, несмотря на то, что приложенные напряжения порой значительно меньше, чем допустимые ограничения нагрузки. Такое явление и называется усталостью материалов. Каждый цикл такого колебания напряжений незначительно ослабляет объект, однако после определенного количества таких циклов прочность теряется и объект разрушается.

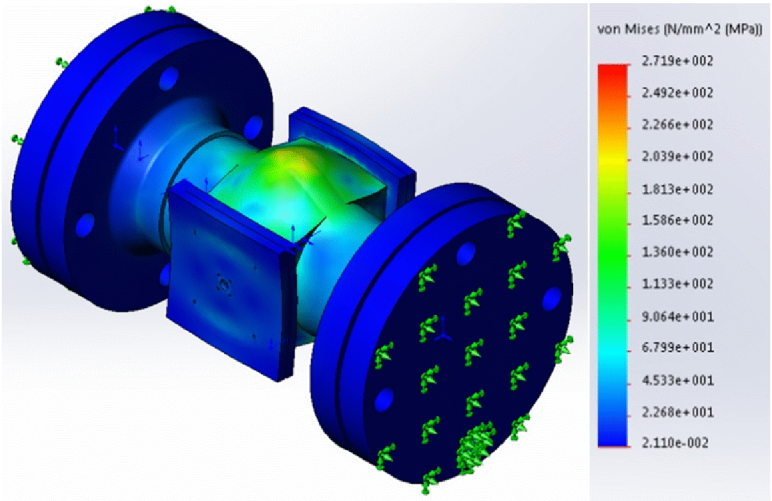


Рис. 5. Эпюра статистического анализа напряжения Von Mises при шкале деформации 227,7 и параметрах расчета: Py = 6,3 МПа, T=100°С.

Приведенные выше статические исследования конструкции разрабатываемого прибора не прогнозируют и не дают в значительной мере информацию об разрушении от усталости, вычисляя лишь реакцию изделия, подвергнутую воздействию эксплуатационных нагрузок. Исследование же на усталость вычисляет срок службы изделия, основанный на особенностях усталости материалов.

На рис. 6 показана эпюра повреждения при усталости материалов после 1000 циклов нагрузки при параметрах расчета:

Py = 6,3 МПа, T = 100°С.

Из эпюры видно, что при заданных параметрах на внешней оболочке больше всего пострадала область, находящаяся в месте сварки трубы с противоположными сегментами технологического измерительного канала, которая составила порядка 0,7% в узлах данного сегмента. Причем необходимо отметить, что для разрушения этого сегмента, согласно рис. 7. необходимо применить не менее 34500 циклов (испытано при 1000 циклах). Минимальные повреждения в основном объеме изделия составили менее 0,1%, с возможным сроком службы более миллиона циклов. Однако внутри стального корпуса имеется узел с максимальным повреждением около 3 %, находящийся на месте пластины из стеклотекстолита толщиной 10 мм с помещенной внутри нее микрополосковой антенной. Однако в расчете использован листовой компаунд, обладающий менее низким пределом прочности в сравнении со стеклотекстолитом, в связи с отсутствием в базе программы SOLIDWORKS Simulation последнего. Поэтому в реальных условиях, с оригинальным материалом, данный узел прослужит гораздо дольше. Исследования

усталости материалов после 1000 циклов нагрузки при *Py* = 6,3 МПа и *T* = 20 °С показали, что на всем стальном корпусе минимальные повреждения в основном объеме изделия составили менее 0,1 %, с возможным сроком службы более миллиона циклов.

Однако повреждения на описанной выше пластине из компаунда составили до 20 % с полным разрушением при 5150 циклах, что связанно с разными значениями прочностных характеристик данного материала при различных температурах.

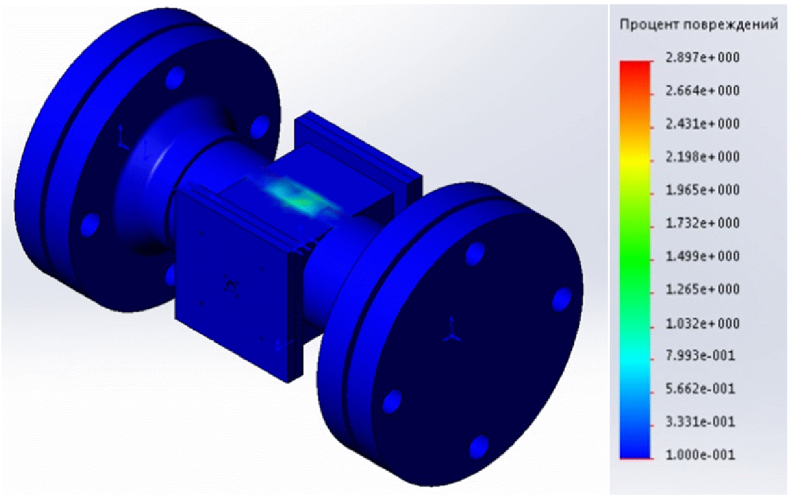


Рис. 6. Эпюра повреждения при усталости материалов после 1000 циклов нагрузки при параметрах расчета: *Py* = 6,3 МПа, *T*=100°С.

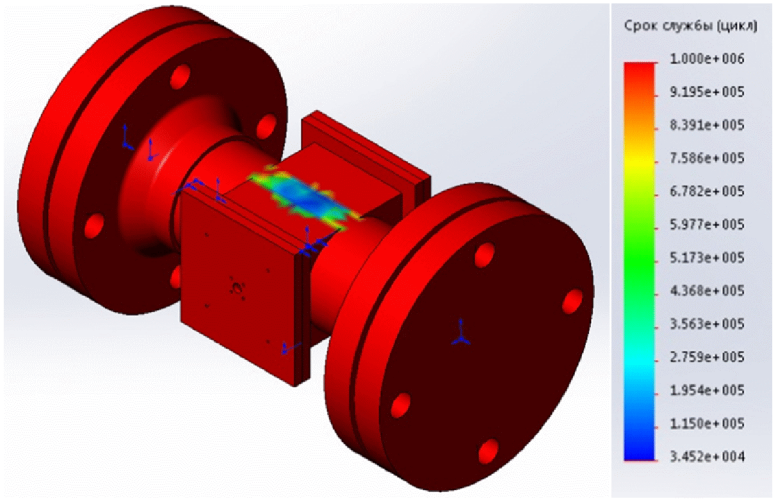


Рис. 7. Эпюра срока службы при расчете усталости материалов после 1000 циклов нагрузки при параметрах расчета: *Py* = 6,3 МПа, *T*=100°С.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований обоснованы условия эксплуатации и разработана и изготовлена конструкция опытного образца измерительной камеры прибора для изучения содержания воды в нефти и нефтепродуктах с аргументированным выбором материалов и расчетом элементов конструкций.

При оценивании прочности элементов конструкции создаваемой опытной измерительной камеры прибора с использованием программного продукта SOLIDWORKS Simulation можно сказать, что в наиболее критических условиях эксплуатации используемых в расчетах при *Py* = 6,3 МПа и *T*=100 °С данная конструкция может функционировать и правильность выбора ее элементов и материалов для них подтверждается. Однако очевидно, что элементы нагрузки на разные части конструкции разработанного прибора прикладываются неравномерно, разброс на изделии превышает порой в численном эквиваленте несколько порядков. При этом основная нагрузка сосредо-

точена в месте сварки трубы с противоположными сегментами технологического измерительного канала. Исследования на усталость показали, что для разрушения этого сегмента необходимо применить не менее 34500 циклов нагрузки при параметрах расчета: Py = 6,3 МПа, T = 100 °С.

Данная конструкция является достаточной для намеченных целей, но после отработки метода и методик измерения на ней будут дорабатываться конструктивные особенности измерительной камеры прибора с целью минимизации и равномерности распределения нагрузок на элементы её конструкции, что должно значительно увеличить срок его (прибора) безаварийной и безопасной длительной эксплуатации.

Список литературы

1. ГОСТ Р 8.595-2004 Масса нефти и нефтепродуктов. Общие требования к методикам выполнения измерений. — М.: Стандартинформ, 2004. — 24с.
2. ГОСТ 8.615-2005. Измерения количества извлекаемых из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования. — М.: Стандартинформ, 2005. — 42с.
3. Широков И.Б. Приборы, применяемые для определения содержания воды в нефти и нефтепродуктах (обзор) / И.И. Марончук, И.Б. Широков // Энергетические установки и технологии, 2018. — Т. 4. — № 1. — С. 56—73.
4. Широков И.Б. Методы определения водосодержания в нефти и нефтепродуктах, остаточного содержания нефтепродуктов в воде / И.И. Марончук, И.Б. Широков // Энергетические установки и технологии, 2017. — Т. 3. — № 4. — С. 130—145.
5. Технологические нефтепроводы нефтебаз // Ю.Д. Земенков, Н.А. Малюшин, Л.М. Маркова, А.Е. Лощинин // Справочное издание. Тюменский индустриальный институт, Тюмень,1994 — 85 с.
6. ГОСТ 32569-2013. Трубопроводы технологические стальные. Требования к устройству и эксплуатации на взрывопожароопасных и химически опасных производствах. — М.: Стандартинформ, 2015. — 189 с.
7. СТО-СА-03-005-07. Технологические трубопроводы нефтеперерабатывающей, нефтехимической и химической промышленности. Требования к устройству и эксплуатации. — М.: Ростехэкспертиза, 2007. — 233 с.
8. ПБ 03-585-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации технологических трубопроводов — М.: Госгортехнадзор России, 2003. — 74 с.
9. ГОСТ 32388-2013. Сосуды Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия. М.: Стандартинформ, 2014. — 109 с.
10. ГОСТ 5632-2014. Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. — М.: Стандартинформ, 2015. — 49 с.
11. ГОСТ 9940-81. Трубы бесшовные горячедеформированные из коррозионно-стойкой стали Технические условия. — М.: Госстандарт России, 2000. — 7с.
12. ГОСТ 9941-81. Трубы бесшовные холодно- и тепло-деформированные из коррозионно-стойкой стали Технические условия. — М.: Госстандарт России, 2000. — 8с.
13. ГОСТ Р 52857.2—2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. М.: Стандартинформ, 2008. — 72 с.
14. ГОСТ Р 52857.4-2007. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. М.: Стандартинформ, 2008. — 142 с.
15. СТО-СА-03-004-07. Расчет на прочность сосудов и аппаратов. — М.: РОСТЕХЭКСПЕРТИЗА, 2007. — 277 с.
16. Методика расчета на прочность резьбовых соединений: метод. указания / С.Л. Лебский, М.М. Матлин, А В. Попов, А.А. Тетюшев, И.М. Шандыбина // ВолгГТУ. — Волгоград, 2010. — 32 с.
17. ГОСТ 12815-80. Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов на Ру от 0,1 до 20,0 МПа (от 1 до 200 кгс/см2). Типы. Присоединительные размеры и размеры уплотнительных поверхностей. М.: Госстандарт России, 2000. — 20с.

References

1. GOST R 8.595-2004 The weight of oil and oil products. General requirements for measurement techniques. — Moscow: Standartinform, 2004. — 24p.
2. GOST 8.615-2005. Measurements of the amount of oil and oil gas extracted from the bowels. General metrological and technical requirements. — Moscow: Standardinform, 2005. — 42p.
3. Shirokov I.B. Instruments used to determine water content in oil and petroleum products (review) / I.I. Maronchuk, I.B. Shirokov // Power installations and technologies, 2018. — T. 4. — № 1. — P. 56—73.
4. Shirokov I.B. Methods for determination of water content in oil and oil products, residual oil content in water / I.I. Maronchuk, I.B. Shirokov // Energy Settings and Technologies, 2017. — T. 3. — No. 4. — P. 130—145.
5. Technological oil pipelines of oil depots // Yu.D. Zemenkov, N.A. Malyushin, L.M. Markova, A.E. Loshchinin // Reference publication. Tyumen Industrial Institute, Tyumen, 1994 — 85 p.

6. GOST 32569-2013. Pipelines technological steel. Requirements for the device and operation in explosive and hazardous chemical production. — Moscow: Standard-tinform, 2015. — 189 p.
7. SRT—CA—03—005—07. Process pipelines for oil refining, petrochemical and chemical industries. Requirements for the device and operation. — Moscow: Rostechexpertiza, 2007. — 233 p.
8. PB 03-585-03. Rules for the Arrangement and Safe Operation of Technological Pipelines — Moscow: Gosgortekhnadzor of Russia, 2003. — 74 p.
9. GOST 32388-2013. Vessels Technological pipelines. Norms and methods for calculating strength, vibration and seismic effects. Moscow: Standartinform, 2014. — 109 p.
10. GOST 5632-2014. Alloyed stainless steels and alloys are corrosion-resistant, heat-resistant and heat—resistant. Stamps. — Moscow: Stantarentinform, 2015. — 49 p.
11. GOST 9940-81. Pipes, seamless, hot—formed of corrosion—resistant steel. Specifications. — Moscow: Gosstandart of Russia, 2000. — 7p.
12. GOST 9941-81. Seamless cold-and-heat-deformed pipes of corrosion-resistant steel. Specifications. — Moscow: Gosstandart of Russia, 2000. — 8p.
13. GOST R 52857.2-2007. Vessels and apparatuses. Norms and methods of strength calculation. Calculation of cylindrical and conical shells, convex and flat bottoms and covers. M.: Standardtinform, 2008. — 72 p.
14. GOST R 52857.4-2007. Vessels and apparatuses. Norms and methods of strength calculation. Calculation of the strength and tightness of flange joints. Moscow: Standartinform, 2008. — 142 p.
15. STO-CA-03-004-07. Calculation of the strength of vessels and apparatus. — Moscow: ROSTEHEKSPERTIZA, 2007. — 277 p.
16. Method for calculating the strength of threaded joints: a method. instructions / S.L. Lebsky, M.M. Matlin, A.V. Popov, A.A. Tetyushev, I.M. Shandubin // VolgGTU.—Volgograd, 2010.—32 p.
17. GOST 12815-80. Flanges of fittings, connecting parts and pipelines on Pu from 0.1 to 20.0 MPa (from 1 to 200 kgf / cm^2). Types. Connecting dimensions and dimensions of sealing surfaces. Moscow: Gosstandart of Russia, 2000. — 20 p.

ISSN 2413-5526

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 4 № 2

SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 4 No 2

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

Адрес редколлегии:
ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация
E-mail nauchnyyzhurnal@mail.ru
тел. +7(8692) 71-01-64.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнения, высказываемые авторами в публикуемых статьях, не всегда совпадают с мнением редакции. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Научный журнал «Энергетические установки и технологии» издается в авторской редакции.

Компьютерная верстка: *Е.А. Нестерова, А.А. Чуклин*

Подписано к печати 21.05.2018. Изд. № 33/18. Зак. 33/18. Тираж 65 экз.
Объем 16,5 п.л. Усл. печ. л. 15,34. Уч.-изд. л. 16,17. Формат бумаги 60 х 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»