

ISSN 2663-4228

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ
*Основан
в 1997 году*

Серия Г
**Технические
науки**

1/2018

Редакционная коллегия журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки»

Главный редактор – д-р техн. наук, проф. **В.В. Белоусов**

Зам. главного редактора – д-р техн. наук, проф. **В.В. Данилов**

Ответственный секретарь – **И.А. Третьяков**

Члены редколлегии: д-р техн. наук, проф. **Н.И. Болонов**; д-р техн. наук, проф. **С.А. Горожанкин**; канд. техн. наук, доц. **В.Д. Коренев**; канд. техн. наук, ст. науч. сотр. **А.А. Курушин** (Московский энергетический институт, Российская Федерация); канд. техн. наук, доц. **И.А. Молоковский**; канд. техн. наук, доц. **В.В. Паслён**; канд. физ.-мат. наук, доц. **В.И. Тимченко**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Шарий**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Ермоленко**; д-р техн. наук, проф. **Ф.В. Недопекин**; д-р ф.-м. наук, д-р техн. наук, проф. **В.К. Толстых**; д-р техн. наук, проф. **Г.В. Аверин**; председатель Госкомэкополитики при Главе ДНР **Р.В. Кишкань**; д-р хим. наук, проф. **А.И. Сердюк**; д-р техн. наук, проф. **А.П. Симоненко**.

**The Editorial Board of the journal “Bulletin of Donetsk National University.
Series G: Technical science”**

The Editor-in-Chief – Dr. of tech., prof. **V.V. Belousov**

The Deputy of the Editor-in-Chief – Dr. of tech., prof. **V.V. Danilov**

Executive Secretary – **I. A. Tretiakov**

The Members of the Editorial Board: Dr. of tech., prof. **N.I. Bolonov**; Dr. of tech., prof. **S.A. Gorozhankin**; Cand. of tech., docent **V.D. Korenev**; Cand. of tech., senior researcher **A.A. Kurushin** (Moscow Power Engineering Institute, Russian Federation); Cand. of tech., docent, **I.A. Molokovskiy**; Cand. of tech., docent **V.V. Paslyon**; Cand. of phys. and math., docent **V.I. Timchenko**; Cand. of tech., docent **T.V. Sharii**; Cand. of tech., docent **T.V. Ermolenko**; Dr. of tech., prof. **F.V. Nedopekin**; Dr. of phys. and math., Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh**; Dr. of tech., prof. **G.V. Averin**; Chairman of the State Committee on Ecological Policy at the Head of the DPR **R.V. Kishkan**; Dr. of chem., prof. **A.I. Serdiuk**; Dr. of tech., prof. **A.P. Simonenko**.

Адрес редакции: ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ул. Университетская, 24, 283001, г. Донецк

Тел.: +38 (062) 302 07 81, +38 (062) 302 92 88

E-mail: vestnik.donnu.g@donnu.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

*Печатается по решению Ученого совета
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»
Протокол № 5 от 27.04.2018 г.*

**Вестник
Донецкого
национального
университета**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Серия Г: Технические науки

№ 1

Донецк 2018

СОДЕРЖАНИЕ

**ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ**

- Пометун Е.Д., Болонов Н.И., Лебедев В.Н.* Экспериментальные стенды для исследования динамических характеристик измерительных преобразователей температуры 4
- Аверин Г.В., Звягинцева А.В.* Построение шкал для измерения состояний сложных объектов в многомерных пространствах 13

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

- Молоковский И.А., Яремко И.Н., Лозинская В.Н.* Метод определения координат мобильных объектов в инфокоммуникационной сети угледобывающего предприятия 24
- Тимошенко К.М., Паслён В.В.* Исследование влияния излучения мобильного телефона на организм человека 30

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Гмыря В.А., Данилов В.В.* Оптические информационные технологии. Инвариантные системы 37
- Шарий Т.В.* Инструментальная среда цифровой обработки и исследования речевых сигналов «CogniSPEECH» 47

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Горожанкин С.А., Савенков Н.В.* Тепловые насосы, работающие по циклу Стирлинга, с цилиндрами постоянной температуры 58
- Белоусов В.В., Бодряга В.В., Бондаренко В.И., Недопекин Ф.В., Павлов Я.В.* Интенсификация процесса десульфурации в агрегате ковш-печь 66

**ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА
И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

- Симоненко А.П., Асланов П.В., Собко А.Ю., Фоменко С.А.* Решение проблем экологии и техногенно-экологической безопасности путем применения гидродинамически-активных композиций 73
- Ялалова М.М., Сердюк А.И., Солдатов С.А.* Очистка промывочных вод гальванического производства от соединений свинца 95
- Правила для авторов 100

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997

Series G: Technical science

No 1

Donetsk 2018

CONTENTS

INSTRUMENT ENGINEERING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Pometun E., Bolonov N., Lebedev V.* Experimental equipment for research of dynamic characteristics of measuring temperature transducers 4
- Averin G.V., Zviagintseva A.V.* Scale construction for complex objects conditions measuring in multidimensional spaces 13

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Molokovskiy I.O., Yaremko I.N., Lozinskaya V.N.* Model of mobile object localization in industrial networks 24
- Timoshenko K., Paslyon V.* Investigation of the influence of the radiation of the mobile telephone on the human organism 30

COMPUTER SCIENCE AND COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

- Gmyrya V.A., Danilov V.V.* Optical information technology. invariant system 37
- Sharii T.V.* The CogniSPEECH instrumental environment for speech signal digital processing and research 47

INDUSTRIAL HEAT AND POWER ENGINEERING

- Gorozhankin S.A., Savenkov N.V.* Heat pumps operating on the Stirling cycle with constant temperature cylinders 58
- Bilousov V., Bodryaga V., Bondarenko V., Nedopekin F., Pavlov Ya.* Intensification of the desulfuration process in the unit ladle furnace 66

ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN SERVICES

- Simonenko A.P., Aslanov P.V., Sobko A.Y., Fomenko S.A.* Solving the problems of ecology and technogenic-ecological safety by application of hydrodynamically-active compositions 73
- Yalalova M.M., Serdyuk A.I., Soldatov S.A.* Cleaning of washing waters of galvanic production from lead connections 95
- Instructions for authors 100

Уважаемые коллеги!

Этим номером мы открываем новую серию Вестника Донецкого национального университета – Технические науки (серия Г). В журнале будут представлены следующие разделы:

- Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы;
- Радиотехника и связь;
- Информатика, вычислительная техника и управление;
- Промышленная теплоэнергетика;
- Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства.

Указанные разделы связаны с основными научными направлениями, которые развиваются на физико-техническом факультете университета.

Вместе с тем, в редколлегию журнала вошли не только представители Донецкого национального университета, но и ведущие ученые Донецкого региона – специалисты в вышеуказанных отраслях науки, представляющие не только вузовскую, но и производственную науку. Журнал будет выходить четыре раза в год.

Важнейшими задачами журнала являются: обобщение научных и практических достижений специалистов в вышеуказанных областях, специализирующихся на выполнении перспективных фундаментальных и прикладных исследований и разработке приоритетных наукоемких технологий.

Мы надеемся, что в дальнейшем наш журнал получит регистрацию в ВАК ДНР и войдет в библиографическую и реферативную базу РИНЦ.

Журнал предназначен для профессорско-преподавательского состава и научных работников высших учебных заведений и научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников производственных предприятий и проектных организаций, а также для аспирантов, магистрантов и студентов.

Главный редактор журнала,
д.т.н., проф.



Вячеслав Белоусов

П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е , М Е Т Р О Л О Г И Я И И Н Ф О Р М А Ц И О Н Н О - И З М Е Р И Т Е Л Ь Н Ы Е П Р И Б О Р Ы И С И С Т Е М Ы

УДК 62-1/-9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТЕНДЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

© 2018 *Е.Д. Пометун, Н.И. Болонов, В.Н. Лебедев*

В статье приводится описание экспериментальных стендов, разработанных в лабораторном комплексе кафедры ФНПМиЭ им. И.Л. Повха ГОУ ВПО «ДонНУ» и предназначенных для исследования динамических характеристик термопреобразователей путем воздействия испытательных сигналов, моделирующих ступенчатую и дельта – функции (функции Хэвисайда и Дирака).

Ключевые слова: лабораторный комплекс, динамические характеристики, термопреобразователь.

Введение. В ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» на кафедре физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им И.Л. Повха создан учебно-исследовательский лабораторный комплекс, для изучения нестационарных процессов в атмосфере, процессов теплообмена в неизотермических струях и исследования динамических характеристик датчиков различных типов. В учебном процессе комплекс используется для обучения студентов навыкам работы со сложной измерительной аппаратурой и более глубокого усвоения теоретических знаний. Кроме учебной работы, комплекс используется для выполнения научно-исследовательских и дипломных работ по специальностям: метрология и стандартизация, экология, техносферная безопасность и техническая физика.

Одной из актуальных задач в области физики атмосферы является изучение законов распределения полей скорости и температуры в неизотермических струях и изучение процессов обмена импульсом в стратифицированных неизотермических течениях. Эти задачи имеют ряд практических приложений, таких как моделирование выбросов тепловых электростанций, распространения в атмосфере выбросов из промышленных труб и т.д. Для моделирования этих процессов используются следующие установки:

- замкнутая аэродинамическая труба малых скоростей;
- разомкнутая аэродинамическая труба для исследования влияния местных сопротивлений и процессов развития профиля скорости;
- установки для моделирования горизонтальных и вертикальных затопленных всплывающих струй;
- стенд для моделирования трехслойных неизотермических течений;
- аэродинамический стенд АДС 200/250.

При исследовании нестационарных процессов в атмосфере и промышленных установках широко применяются тепловые методы измерения физических параметров. В качестве первичных преобразователей используются термодпары, термисторы, термометры сопротивления и т.д. Важнейшим направлением является изучение

динамических характеристик датчиков [1]. Для измерения динамических характеристик термопреобразователей лабораторный комплекс содержит следующие экспериментальные стенды, позволяющие реализовать прямой метод измерения переходных процессов с использованием моделей функций Хэвисайда (ступенчатый испытательный сигнал) и Дирака (импульсный испытательный сигнал):

- аэродинамический стенд, создающий 2-х слойный стратифицированный поток;
- аэродинамический стенд, создающий 3-х слойный стратифицированный поток;
- стенд для исследования динамических характеристик термопар;
- стенд для исследования динамических характеристик термисторов;
- стенд для моделирования физического воздействия импульсного испытательного сигнала.

Описание лабораторных стендов для исследования динамических характеристик термопреобразователей

1. Аэродинамический стенд, создающий 2-х слойный стратифицированный поток.

С целью физического моделирования ступенчатого испытательного сигнала был предложен и реализован прямой способ изучения динамических характеристик термопреобразователей [2]. Способ основан на создании стратифицированного воздушного потока, со скачкообразным изменением профиля скорости и температуры между стратами и быстрым перемещением датчика между слоями. Стенд представляет собой аэродинамическую трубу (АТ) разомкнутого типа с двумя плоскопараллельными каналами. Ступенчатое воздействие создается путем перемещения датчика между стратами с заданными значениями температуры и скорости [2]. Графическое представление стенда приведено на рисунке 1.

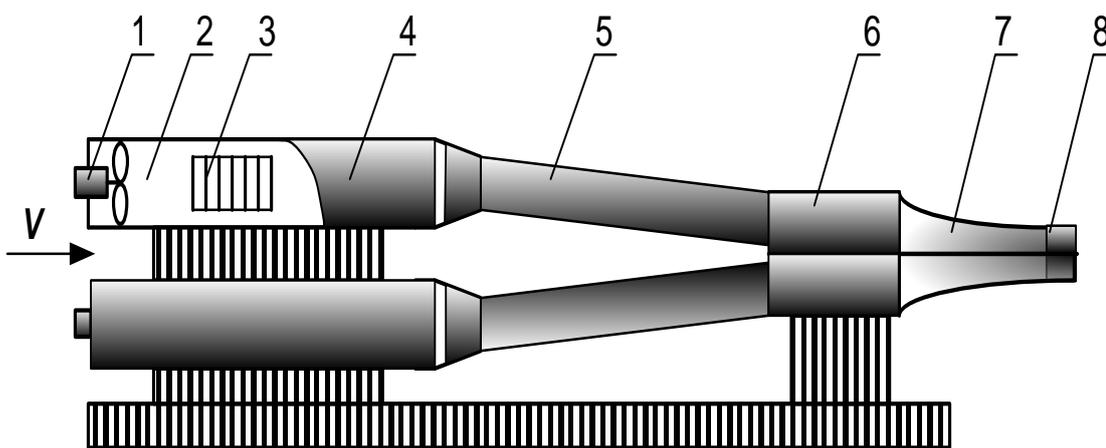


Рис. 1. Внешний вид стенда, для моделирования ступенчатого испытательного сигнала:

- 1 – вентилятор, 2 – начальный участок АТ, 3 – нагреватель, 4 – теплообменник,
5 – прямоугольный участок, 6 – форкамера, 7 – конфузор, 8 – насадка

Для формирования заданного профиля скорости используется конфузор, разделенный тонкой перегородкой [3,4]. Внешний вид конфузора приведен на рисунке 2.

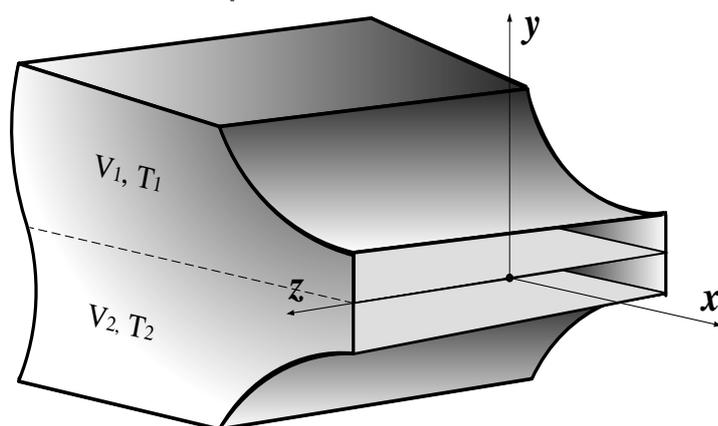


Рис. 2. Рабочая зона АТ

Существуют определенные ограничения на минимальную длительность переходного процесса исследуемого средства измерений, в частности, длительность пересечения границы раздела должна быть значительно меньше длительности переходной характеристики, и величина области должна удовлетворять условию

$$\tau_{cu} \geq 10 \cdot \frac{H}{V}, \quad (1)$$

где H – ширина области смешения слоев, V – скорость перемещения СИ.

Наличие перегородки между конфузорами приводит к искажению заданного профиля скорости, моделирующего функцию Хэвисайда. С целью уменьшения влияния эффекта прилипания, на срезе конфузора монтировались прямоугольные насадки различной длины, ограничивающие расширение затопленной струи [4].

Установка работает следующим образом: с помощью блоков управления, оператор задает необходимые значения скорости и температуры в каналах. Диапазон регулирования скорости равен $0.1 \div 8$ м/с, температуры – от комнатной до 65°C (устанавливается только в верхнем канале). Быстрое перемещение исследуемого измерительного преобразователя, осуществляется с помощью специального координатного устройства. Выходной сигнал измерительного преобразователя подается на термопреобразователи (термометр, термоанемометр и т.д.) и регистрируется с помощью виртуальной лаборатории, разработанной в программе LabVIEW фирмы National Instruments [5].

2. *Аэродинамический стенд, создающий 3-х слойный стратифицированный поток*

Аэродинамический стенд, создающий 3-х слойный стратифицированный поток позволяет выполнять моделирование слоисто-стратифицированных сдвиговых течений в атмосфере. В основу конструкции стенда положен принцип разомкнутой трёхслойной аэродинамической трубы: три плоско – параллельные, расположенные друг над другом аэродинамические трубы, объединенные одним общим рабочим участком, в котором образуется трехслойный стационарный температурно-стратифицированный поток. Структурная схема стенда приведена на рисунке 3.

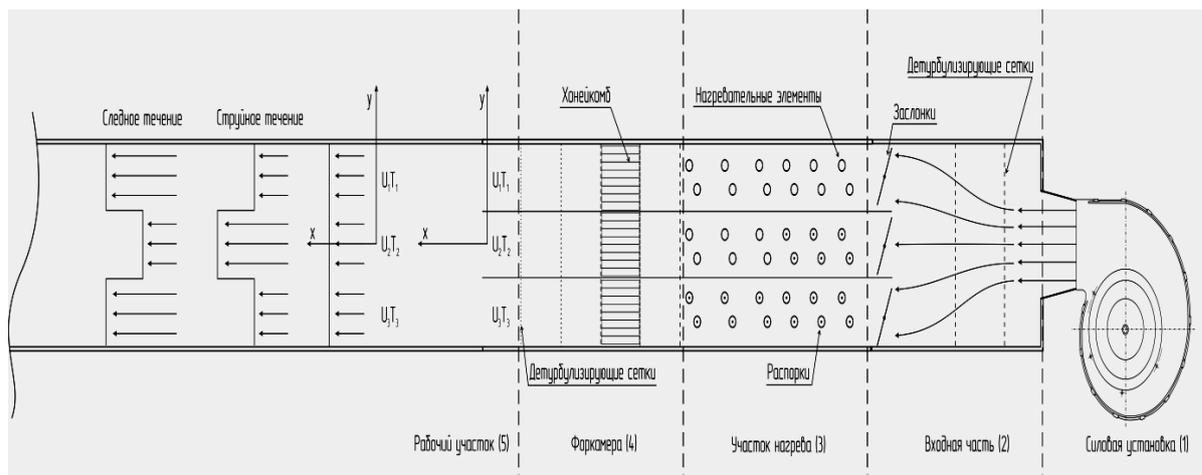


Рис. 3. Структурная схема стенда

Аэродинамический стенд (рис. 3) состоит из силовой установки (1), входной части (2), участка нагрева (3), форкамеры (4) и рабочего участка (5). Силовая установка представляет собой центробежный вентилятор, подключенный к частотному преобразователю, с максимальной допустимой рабочей частотой 50 Гц. Во входной части воздушный поток делится по трем слоям с регулируемыми скоростями в каждом из них. Для распределения потока в камере установлены две перфорированные стальные решётки и заслонки, позволяющие регулировать скорость в слое от 0,5 м/с до 3 м/с.

Участок нагрева совмещен с форкамерой. В форкамере для уменьшения масштаба турбулентных пульсаций воздушного потока установлен хонейкомб из тонкостенных стеклянных трубок с большим удлинением ($l/D = 50$) и блок из пяти детурбулизирующих сеток.

Температура слоев регулируется в широких пределах относительно температуры нижнего слоя таким образом, что разность температуры между слоями составляет не менее 20°C . Моделируются только устойчиво-стратифицированные течения такие, что температура вышележащего слоя выше температуры нижележащего.

Рабочий участок представляет собой прямоугольный лоток, в котором размещаются измерители скорости и температуры потока.

Аэродинамический стенд позволяет моделировать течения в широком диапазоне изменения чисел подобия, при этом глобальное число Ричардсона Ri в слое изменяется в пределах от 0,02 до 150, глобальное число Рейнольдса Re равно 3100, динамическое число Ричардсона Ri_δ слоя смешения изменяется в пределах от 0,25 до 10, динамическое число Рейнольдса Re_δ слоя смешения равен 1500.

3. Стенд для исследования динамических характеристик термопар

Для исследования динамических характеристик термоэлектрических измерительных преобразователей разработан стенд, позволяющий моделировать воздействие ступенчатого испытательного сигнала на средство измерения без учета влияния вынужденной конвекции. Графическое изображение стенда представлено на рисунке 4.

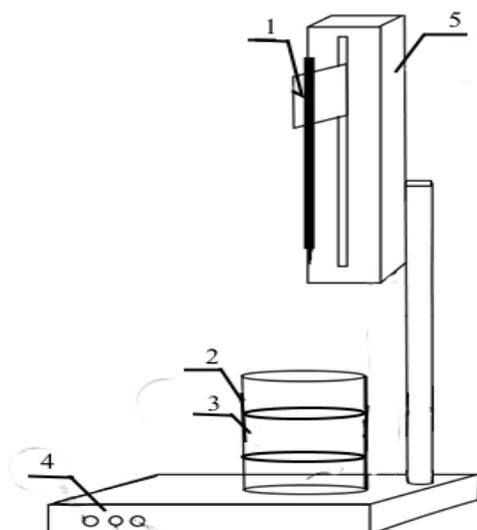


Рис. 4. Графическое изображение измерительного стенда:
1 – термопара, 2 – колба, 3 – температурно-стратифицированная жидкость;
4 – переключатели, 5 – координатное устройство

Измерения переходной характеристики, при воздействии ступенчатого испытательного сигнала на термопару, выполняется следующим образом. С помощью нагревательного прибора, вода в специальном контейнере доводится до температуры кипения, так что в верхней части контейнера температура жидкости становится близкой к 100°C , а в нижней – к температуре окружающей среды, т.е. возникает температурная стратификация. С помощью координатного устройства, рычаг с закрепленной на нем термопарой, опускается, и термопара переходит из разогретой воды в воду с комнатной температурой. Выходной сигнал термопары подается на усилитель постоянного тока, и с выхода усилителя – на регистрирующий прибор. На рисунке 5 приведена экспериментальная переходная характеристика, характеризующая динамические свойства термопары.

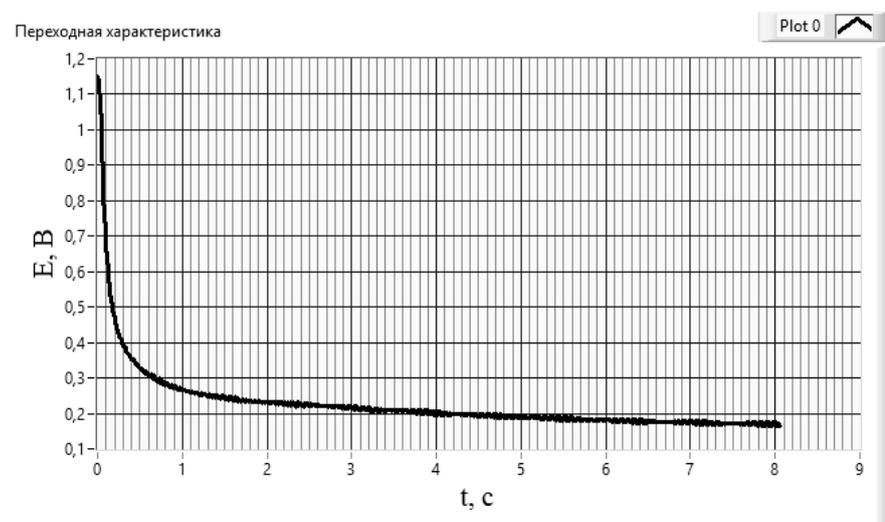


Рис. 5. Экспериментальная переходная характеристика термопары

Полученные данные регистрировались с помощью аналого-цифрового преобразователя NI Usb-6001 и виртуального прибора, разработанного в программе LabVIEW.

4. Стенд для исследования динамических характеристик термисторов

Для исследования динамических характеристик термопреобразователей на основе NTC – термисторов, был разработан и изготовлен автоматизированный малый аэродинамический стенд [6, 7, 8, 9]. Внешний вид стенда приведен на рисунке 6.

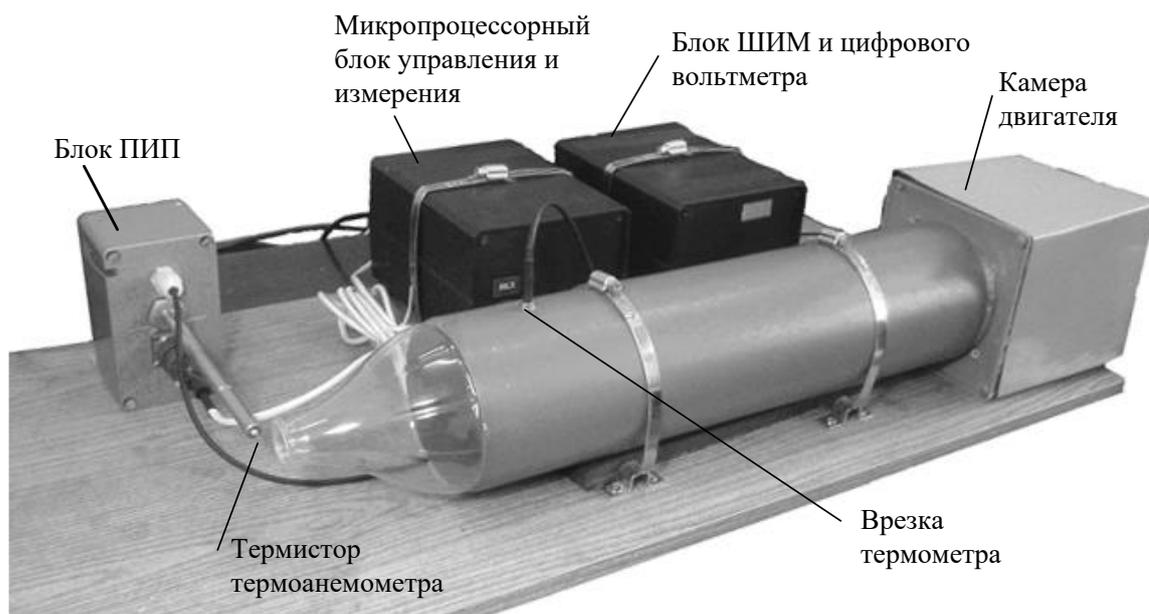


Рис. 6. Фото конструкции аэродинамического стенда

Малый аэродинамический стенд работает следующим образом. С помощью вентилятора создается постоянный поток воздуха. Скорость потока регулируется блоком питания электродвигателя, изготовленном на основе широтно-импульсного модулятора (ШИМ). Исследуемый термопреобразователь (NTC – термистор), в исходном состоянии включается в качестве чувствительного элемента термоанемометра постоянной температуры. По команде оператора ПК, микропроцессорный блок переключает термопреобразователь из режима «анемометр» в режим «термометр», причем, длительность переключения между режимами значительно меньше, чем минимально возможная постоянная времени исследуемых терморезисторов. Т.к температура разогрева датчика термоанемометра для каждого конкретного термистора строго постоянна, то, в момент переключения, термистор всегда имеет постоянную температуру. Охлаждение термистора осуществляется в потоке воздуха, чем выше скорость воздуха, тем меньше постоянная времени.

В процессе разогрева и охлаждения термистора происходит имитация мгновенного переноса чувствительного элемента из среды с высокой температурой в среду с более низкой температурой, таким образом, происходит моделирование ступенчатого физического воздействия на датчик, с помощью электрических сигналов, датчик при этом остается неподвижным. Окно программы приведено на рисунке 7.



Рис. 7. Окно программы управления режимами и регистрации измерительных данных малого аэродинамического стенда

Данные выводятся на график и накапливаются в виде массива с возможностью сохранения в файл для дальнейшей компьютерной обработки.

5. Аэродинамический стенд для моделирования импульсного испытательного сигнала (дельта – функции)

С целью реализации прямого метода исследования динамических характеристик, при воздействии импульсного испытательного сигнала на термопреобразователь, был предложен способ, основанный на создании температурно-стратифицированного воздушного потока в рабочей части аэродинамической трубы. Графическое представление рабочего участка аэродинамической трубы, устройства для моделирования дельта-функции и устройства перемещения датчика (термопары) приведены на рисунке 8.

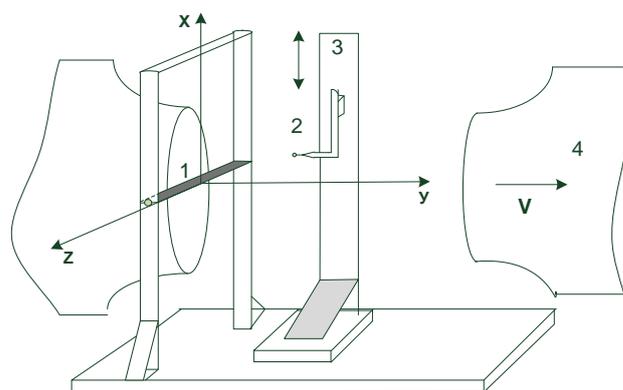


Рис. 8. Графическое представление рабочего участка аэродинамического стенда:
1 – ленточный нагреватель, 2 – датчик, 3 – координатное устройство, 4 – аэродинамическая труба

Стенд состоит из следующих основных модулей: аэродинамической трубы, устройства перемещения датчика и ленточного нагревателя. Перемещение

исследуемого термопреобразователя выполнялось со скоростью от 0.2м/с до 1 м/с, амплитуда перемещения регулировалась от 0.1м до 0.25м.

Измерительная часть состоит из исследуемого датчика (термопары), подключенному к усилителю постоянного тока. Для регистрации выходного сигнала термопары использовалось 14-ти разрядный АЦП фирмы National Instruments USB 6001. Последующая обработка полученных данных выполнялась в виртуальной лаборатории, созданной в среде графического программирования LabVIEW.

Выводы:

1. Разработанные экспериментальные стенды для исследования динамических характеристик термопреобразователей позволяют выполнять физическое моделирование ступенчатого и импульсного испытательных сигналов.
2. Описанные стенды составляют часть научно-исследовательского комплекса кафедры ФНПМиЭ им. И.Л. Повха и широко используются в учебном процессе и при выполнении научных работ.
3. Стенды оснащены современным измерительным оборудованием и приборами, обработка результатов измерений выполняется в виртуальных лабораториях, разработанных в программной среде LabVIEW.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГСИ. Динамические измерения. Термины и определения: МИ 1951 – 88. – [Введ. 01. 01.89]. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 17 с.
2. Пат. 95326 U. Україна, МПК G01P 21/00, G01K 15/00. Спосіб прямого визначення динамічних характеристик термоперетворювачів / М.І.Болонов, Д.А.Чупіс, Д.М.Кузнецов; заявник і патентовласник Донецький національний університет. – № u201405589; заявл. 26.05.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24.
3. Пометун Е.Д. Моделирование функции Хэвисайда в рабочей части аэродинамической трубы / Е.Д.Пометун, Н.И. Болонов, В.В. Белоусов, В.Н. Лебедев // Сборник статей 9-й международной научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения». – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2016. – С. 267-269.
4. Пометун Е.Д. Оптимизация сужающего устройства для моделирования функции Хэвисайда в рабочей части аэродинамической трубы / Е.Д.Пометун, Н.И.Болонов, В.Н.Лебедев // Материалы I Международной научной конференции (Донецк, 16-18 мая 2016 г.). – Том 1. Физико-математические, технические науки и экология / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – С.184-186.
5. Использование программной среды LabVIEW для автоматизации проведения физических экспериментов. Кудрин А.В. Электронное учебно-методическое пособие. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2014. – 68 с.
6. Кузнецов Д.Н. Исследование физической модели ступенчатого испытательного воздействия для определения динамических характеристик термопреобразователей / Д.Н.Кузнецов, Д.А.Чупіс // Научные труды ДонНТУ. Сери: вычислительная техника и автоматизация. – №1(26).-2016, 202 – 209 с.
7. Пометун Е.Д., Лебедев В.Н. Исследование функций аппроксимации градуировочной характеристики термоанемометра в неизотермическом газовом потоке. Сборник научных трудов «Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе», №1(8)–2(9)'2015.
8. Кузнецов Д.Н. Электронная система малого аэродинамического стенда градуировки и исследований импульсных термоанемометров / Д.Н.Кузнецов, В.Н.Лебедев, А.Н.Левченко // Научные труды ДонНТУ. – Выпуск 171. – Донецк, 2010 – С.111-117.
9. Кузнецов Д. Н. Особенности градуировки термоанемометров с нестационарным режимом разогрева термочувствительного элемента / Д.Н.Кузнецов, Ю.Д.Украинский, А.А.Морозов //Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – № 3. – С. 23-27.

Поступила в редакцию 31.01.2018 г.

EXPERIMENTAL EQUIPMENT FOR RESEARCH OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF MEASURING TEMPERATURE TRANSDUCERS

E. Pometun, N. Bolonov, V. Lebedev

The article describes the experimental stands of developed in the laboratory complex of the Department of the FNPMiE named after. I.L. Povkh in the «DonNU» and intended for research of dynamic characteristics of thermal converters by means of test signals simulating step and delta functions (Heaviside and Dirac functions).

Key words: laboratory complex, dynamic characteristics, thermocouple.

Пометун Екатерина Дмитриевна, аспирант кафедры ФНПМиЭ им.И.Л. Повха, ГОУ ВПО «ДонНУ». ДНР, Донецк.

Alternativa19031992@rambler.ru.

г. Донецк, ул. Нестерова 23,а.

Телефон для контактов: +380668521654

Pometun Ekaterina Dmitrievna, Post-graduate student, Donetsk National University

Болонов Николай Иванович, доктор технических наук, профессор. кафедры ФНПМиЭ им. И.Л.Повха. ГОУ ВПО «ДонНУ». ДНР, Донецк

Bolonov Nikolay Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Donetsk National University

Лебедев Владимир Николаевич, заведующий лабораторией, старший преподаватель кафедры ФНПМиЭ им.И.Л. Повха.. ГОУ ВПО «ДонНУ». ДНР, Донецк

lvn@ukr.net.

Lebedev Vladimir Nikolayevich, Head of the laboratory, senior lecturer of the department, Donetsk National University

УДК 303.732.4:536.71:519.25:303.224

ПОСТРОЕНИЕ ШКАЛ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОСТОЯНИЙ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ В МНОГОМЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВАХ

© 2018 *Г.В. Аверин, А.В. Звягинцева*

Предложено использовать известные естественнонаучные принципы для построения измерительных шкал, позволяющих сравнивать состояния сложных объектов одного класса в многомерных пространствах переменных. Разработан метод комплексного измерения состояний по отношению к опорному состоянию, использующий принцип инвариантности расстояний, а также методика получения уравнений состояний в виде феноменологических соотношений. Данная задача актуальна при изучении систем, для которых накоплены значительные объемы опытных данных, которые могут быть представлены в виде темпоральных массивов количественной информации. На примере обработки показателей биологических видов и социально-экономических показателей городов реализована процедура разработки шкалы измерений для относительного сравнения состояний объектов. Это позволяет сформулировать общие методические принципы обработки темпоральных данных для получения феноменологических закономерностей. Предложенный метод в своей сущности является логическим развитием метода термодинамики по отношению к системам различной природы.

Ключевые слова: сложные системы; переменные состояния; эмпирические меры; шкалы измерений; уравнения состояний.

Введение. Сегодня одна из актуальных задач современной науки связана с поиском ответа на вопрос: возможен ли общий подход в прикладном моделировании объектов, процессов и явлений в различных научных областях? Гносеологические аспекты моделирования связаны с построением моделей развития систем и объектов во времени и в пространстве их различных свойств. Это одно из важных направлений современной науки моделирования систем. Чтобы предложить общий подход в моделировании, необходимо процесс построения теорий тесно увязать с обработкой и анализом опытных данных. В данной работе делается попытка предложить методы создания феноменологических моделей на основе единой структуры представления опытных данных без явной привязки к той или иной предметной области.

Любая научная теория может быть построена разными путями, однако она всегда основывается на систематизации опытных данных, установлении базовых эмпирических закономерностей и формировании общих принципов, свойственных предмету исследований науки, а также разработке методологии, использующей математический аппарат. Изложение материала в данной статье основывается на введении понятия эмпирической меры состояния системы (объекта), которое в общем случае может включать в себя самые различные измеряемые величины, направленные на комплексную оценку состояний объектов в каком-либо аспекте, например, геометрические величины, температура, время, вероятности состояний, экспертные оценки интегральных величин и т.д. Эмпирическая мера находится в опыте или наблюдении и представляется комплексной величиной, однозначно характеризующей в целом состояние объекта при изменении его свойств и зависящей от параметров этих свойств. Такой подход позволяет использовать понятие функции по отношению к многомерным пространствам состояний систем различной природы. Это, в свою очередь, дает возможность формировать феноменологические теории применительно к различным объектам и предметам исследований. Отличительной особенностью подхода является то, что исходные гипотезы могут быть приняты или отвергнуты на

основе обработки имеющихся данных опыта или наблюдений, тем самым в каждом конкретном случае анализа данных можно четко определить область применения предлагаемого метода.

Очевидно, что для создания развитых теорий в предметных областях нужны обширные базы данных структурированной информации о состоянии и функционировании сложных объектов и систем. Здесь речь идет об общем представлении информации в многомерных пространства переменных в виде структурированных данных для целых классов объектов и явлений. Есть основания считать, что на этой основе могут быть выявлены закономерности, которые являются изоморфными для объектов различной природы. Работы авторов указывают на то, что определенный изоморфизм для некоторых классов объектов следует искать именно в универсальной форме представления опытных данных, характеризующих процессы изменения состояний изучаемых объектов [1 – 6]. Также необходимо отработать методы описания состояний объектов, исходя из общих подходов математического моделирования. В этом плане теория термодинамики дает положительный пример построения феноменологических моделей, исходя из общей логики представления данных, построения шкал измерений, выявления закономерностей и формирования расчетных зависимостей. Сделаем попытку обобщения метода термодинамики по отношению к решению аналогичных задач моделирования в различных предметных областях.

Постановка задачи. Так как все измерения и наблюдения процессов и явлений основываются на изменении различных величин, возникает задача по опытным данным установить закономерности, которые свойственны той или иной системе и которые математически могут описываться феноменологическими соотношениями.

Исходя из этого целью статьи является поиск общих принципов построения шкал для измерения состояний объектов и установление на основе этого феноменологических закономерностей для систем различной природы, которые могут быть положены в основу прикладных теорий. Важной задачей статьи является также иллюстрация реализации соответствующих методов на конкретных примерах.

Данная задача актуальна при изучении сложных систем, для которых накоплены значительные объемы опытных данных, которые могут быть представлены в виде темпоральных массивов количественной информации. Предлагаемый метод в своей сущности является логическим развитием метода термодинамики по отношению к системам различной природы.

Обобщение феноменологического метода термодинамики. В термодинамике грань между используемыми феноменологическими моделями и теоретическими закономерностями и зависимостями довольно размыта. Если исходить из термина «феноменологический» как научного результата, который основан на опыте, то уравнение состояния для определенного вещества можно отнести к феноменологической модели, а закон сохранения энергии уже нет. Любое уравнение состояния находится на основе опытных данных путем выбора некоей эмпирической зависимости, которая может иметь достаточно сложный вид. В свою очередь, уравнение сохранения энергии вида $dQ = du + p dv$, хотя и построено на основе данных опыта, но логически обобщает особенности множества термодинамических процессов и поэтому несет в себе элементы уже развитой теории. Исходя из этого, область термодинамической феноменологии ограничена понятиями и базовыми соотношениями, вытекающими из опыта и полученными путем применения строгих

процедур измерений величин. Поэтому, к феноменологическим понятиям, методам и моделям в термодинамике можно отнести:

- физические и химические свойства термодинамических систем, представления о состояниях и параметрах систем;
- понятия эмпирической температуры, теплоемкостей и других термических и калорических величин;
- методы определения количества теплоты и работы;
- системы и шкалы измерения различных величин;
- уравнения состояний веществ и установленные опытным путем законы идеального газа.

В этот перечень также можно включить первый и второй постулаты нулевого начала о тепловом равновесии и существовании функции температуры. Все это и образует в классической термодинамике определенную совокупность феноменологических знаний и представлений. Остальные постулаты, принципы, законы и соотношения попадают в область логических обобщений и сформулированных закономерностей теории.

При анализе теоретических положений классической термодинамики достаточно непросто выделить структурные особенности, основные логические формы и важные принципы формирования ее аналитической теории. Первое, на что следует обратить внимание – это существование двух логических подходов в построении теории, тесным образом связанных между собой и включающим в себя математическое и физическое содержание всей данной области знаний.

Вторая особенность теории – это объединение в одну логическую форму положений статики и динамики термодинамических явлений. При этом состояния термодинамических систем и связанные с этим понятия и закономерности формируют статические представления, а понятия, определения и законы, относящиеся к термодинамическим процессам, формируют динамические представления в данной науке. Исходя из этого, в термодинамической теории имеются как модели, характеризующие пространство состояний систем, так и модели, позволяющие описывать процессы в этом пространстве. Для привнесения в теорию реального физического содержания исходные модели основываются на применении эмпирических величин, которые носят феноменологический характер. Использование таких величин наблюдается практически на всех этапах формирования теории.

В целом структуру термодинамической теории можно представить следующим образом. Строится пространство состояний термодинамических систем относительно атрибутивных параметров этих систем. Данное пространство является универсальным, так как охватывает максимально возможную область наблюдения этих параметров в опыте для многих классов физических систем при различных внешних условиях.

В данном пространстве задаются шкалы температур. Если исходить из трехмерного пространства $\{v, p, T\}$, то шкала абсолютной температуры является шкалой отношений и представляет собой одну из координатных осей в данном пространстве. Шкала эмпирической температуры является шкалой интервалов. Данная шкала в пространстве состояний представляет собой линию L , которая образуется пересечением характеристической поверхности уравнения состояния для водорода и плоскости $v = v_c$. Для идеально-газовой шкалы данная плоскость проходит через точку, которая лежит на характеристической поверхности и имеет координаты $v = v_c$, $p_c = 1000 \text{ мм.рт.ст.}$, $T_0 = 273,15 \text{ К}$. Давление газа при постоянном объеме термометра

линейно меняется с температурой, поэтому линия L является прямой. В идеально-газовом термометре объем термометра поддерживается строго постоянным, а масса водорода принимается такой, чтобы его давление при температуре T_0 составляло $p_c = 1000 \text{ мм.рт.ст.}$, исходя из этого определяется удельный объем v_c . Между абсолютной и эмпирическими шкалами устанавливается взаимно однозначное соответствие в виде уравнения $T = 273,15 + t$, что позволяет данные физических наблюдений в шкале интервалов t переводить в числа координатной оси абсолютной температуры T . На основе опытных данных для разных веществ в образованном пространстве состояний создаются математические модели, характеризующие всю возможную совокупность состояний изучаемых систем, в виде неявных $F_i = (v, p, T) = 0$ и явных уравнений $T = f_i(v, p)$ или данные об уравнениях состояний представляются в табличном виде. Это позволяет в непрерывном пространстве состояний область наблюдаемых состояний для конкретных физических веществ, а также их смесей или растворов, представить характеристическими поверхностями. В свою очередь, термодинамические процессы, которые могут совершаться с веществами, представляются кривыми, полностью лежащими на данных поверхностях.

Каждой точке, которая принадлежит некоторой характеристической поверхности, ставится в соответствие величина количества теплоты. В элементарной окрестности точки количество теплоты и абсолютная температура связаны между собой соотношением $dQ = c_l \cdot dT$, где c_l – функция процесса l , которая отражает особенности осуществляемого термодинамического процесса и позволяет учитывать физику процесса при математическом моделировании. Таким образом, по всей характеристической поверхности задается поле величины, которая называется теплотой Q . Каждой поверхности определенного уравнения состояний будет соответствовать свое поле величины.

В свою очередь, в отличие от декартовой системы координат параметров пространства состояний, на каждой характеристической поверхности могут быть заданы естественные криволинейные координаты, которые будут принадлежать этой поверхности. Между декартовыми и криволинейными координатами будет существовать связь, которая определяется уравнениями преобразования координат. Функции состояния в термодинамике, такие как энтропия, энергия, энтальпия и т.д., могут выступать в качестве естественных криволинейных координат таких поверхностей. Так как естественные координаты покрывают существующие характеристические поверхности, то функции состояния являются полными дифференциалами.

Таким образом, в термодинамике осуществляется параметризация множества состояний – каждому состоянию кроме параметров давления p и удельного объема v присваивается значение температуры T . Координата T в виде термодинамической шкалы градуируется с учетом уравнения состояния идеального газа $p \cdot v = R_i \cdot T$ по реперной точке, в качестве которой берется тройная точка воды ($T_0 = 273,16 \text{ K}$), а давление принимается равным атмосферному ($p = p_0$). Это позволяет построить пространство состояний веществ в виде координатной системы $\{p, v, T\}$. Далее, используя шкалу температур и соответствующие термометры, по экспериментальным данным строится семейство поверхностей состояний различных веществ.

Гипотезы и методы исследования. В основу исследований положен феноменологический метод применительно к системному описанию многомерных данных наблюдений темпоральной структуры. При этом используется логика термодинамического метода, описанная выше.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать перечень эмпирических мер в виде геометрических или вероятностных величин многомерного пространства с целью комплексной характеристики состояний объектов, а также разработать системы измерения этих мер, построенные на основе применения естественнонаучных принципов. Среди таких принципов следует особо выделить принцип соответственных состояний, согласно которому состояния объектов могут подчиняться одному уравнению, если это уравнение выразить через некоторые приведённые переменные. В свою очередь, при моделировании необходимо учитывать также принцип, отражающий определенное сходство по отношению к процессам, которые могут совершать объекты. В качестве такого принципа можно принять принцип подобия, согласно которому геометрические объекты являются подобными, если при их сравнении сохраняется отношение между некоторыми наблюдаемыми величинами или эти величины измеряются по одной шкале. Будем использовать данные принципы при моделировании.

Данные. Результаты наблюдений очень часто представляются как массивы данных, характеризующие совокупность однотипных объектов при изменении их состояний во времени [7]. Такие данные называют темпоральными и они имеют вид многомерных временных рядов. Исходя из этого, будем рассматривать данные наблюдений только темпоральной структуры. В этом случае речь идет о массивах дискретных данных, которые имеют структуру таблиц в виде «объекты-показатели», причем соответствующее количество таблиц упорядочено во времени. В темпоральных массивах данных в качестве объектов выступают однотипные классы (сущности), свойственные реальным объектам. В качестве показателей (атрибутов), могут выступать различные физические, химические, социальные или экономические величины, имеющие количественное измерение.

Пространство состояний. Для темпоральных данных строится среда моделирования в виде пространства состояний. Предположим, что для m объектов одного класса в темпоральных массивах данных содержится количественная информация об n параметрах z_k ($k = 1, 2, \dots, n$), характеризующих свойства изучаемых объектов. Примем эти параметры в качестве переменных состояния.

Любое множество n переменных для параметров свойств задает n -мерное пространство состояний E^n , где $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$, $z \in E^n$. Таким образом, любое состояние в n -мерном пространстве в каждый момент времени будет отображаться многомерной точкой $M = M(z_1, z_2, \dots, z_n)$, а процесс изменения состояния объекта во времени – многомерной кривой.

Пусть в n -мерном пространстве состояний E^n расположено определенное количество дискретных точек M_i $i = 1, 2, \dots, q$, которые являются опытными данными. Представим эти точки как некую ограниченную выборку из сплошной гипотетической среды бесконечного количества состояний для объектов одного класса. Будем использовать континуальный принцип представления дискретной информации в пространстве E^n [3], согласно которому поле состояний считается непрерывным, при

этом каждый элемент пространства связан со всеми соседними элементами с учетом закономерностей, свойственных изучаемой предметной области. Тем самым используется концепция континуального поля некой величины (полевой переменной), которая характеризует в целом состояния объектов.

Будем считать также, что по отношению к наблюдениям справедлив принцип инвариантности, когда в пространстве состояний дискретные данные формируют некий «образ», отражающий в определенной степени сущность континуальных закономерностей полевой величины. При этом инвариантность образа будет связана с изометрией пространства E^n , когда сохраняются расстояния между точками M_i .

Далее, пусть каждой точке M_i может быть поставлена в соответствие некая величина, обладающая свойством неизменности по отношению к преобразованиям переменных z_1, z_2, \dots, z_n . Определим данную полевую величину как эмпирическую меру состояний объектов в пространстве E^n в виде $W = W(M)$.

Основная гипотеза исследования связана с возможностью описания полевых закономерностей путем установления связи между мерой W и априори заданной геометрической метрикой пространства E^n . Эмпирическая мера будет представлять особенности наблюдаемых состояний и процессов как геометрических образов (точек и кривых), исходя из полевых представлений и может быть описана скалярным полем $W = W(M)$, которое инвариантно при преобразованиях координат.

Важным является выбор мер W для характеристики состояний объектов или процессов изменения состояний, а также разработка систем количественного определения этих величин. Эмпирическая мера должна комплексно характеризовать состояния объектов, а также их изменения, соответствовать понятию скалярных величин, иметь область определения от нуля до $+\infty$ или от $-\infty$ до $+\infty$, давать возможность оценивать состояния и процессы изменения состояний объектов на основе универсальной системы измерений применительно ко всему пространству E^n .

В свою очередь, метрика пространства состояний будет связана с переменными z_1, z_2, \dots, z_n и может быть описана скалярной функцией, зависящей от этих величин.

Данная величина будет отражать геометрическую структуру пространства E^n , исходя из той или иной принятой математической модели. Метрику пространства E^n в зависимости от специфики решаемой задачи будем представлять в виде зависимостей относительно всех n показателей: аддитивными, мультипликативными, степенными, однородными или иными зависимостями, или в виде различных мер схожести: евклидова, манхэттенского или степенного расстояний, расстояния Чебышева, Минковского и др. Всего может рассматриваться до 15 – 20 различных мер схожести объектов и метрик пространства.

Будем предполагать, что на основе статистических данных можно установить однозначную связь между эмпирическими мерами W и метрикой пространства состояний изучаемой системы, в качестве которой далее, для примера, как частный случай, используется евклидова метрика. Таким образом, исходная задача создания феноменологических моделей применительно к пространству состояний E^n может быть сформулирована следующим образом.

Имеются результаты опыта в виде темпоральных данных, относящихся к некоторому множеству однородных объектов определенной природы. Формируется

пространство состояний E^n относительно показателей объектов. Предлагается некая эмпирическая мера $W(M)$ для состояний объектов как полевая величина, которой, как мы предполагаем, свойственны континуальные закономерности. В пространстве E^n представлены данные опыта в виде дискретных точек M_i , также отражающие эти закономерности. Априори предлагается геометрическая модель пространства состояний E^n в виде той или иной математической модели. Применяя принципы соответственных состояний и подобия величин, а также обрабатывая имеющиеся опытные данные, следует построить феноменологическую модель для состояний объектов в геометрическом пространстве E^n , которая будет описывать эмпирические закономерности.

Количественные знания о свойствах и закономерностях поведения различных систем обычно представляются в форме уравнений состояний, где одни параметры систем выражаются через другие. Обычно, для построения уравнений выбирается опорный объект или опорное состояние, а все остальные состояния соотносятся с выбранной точкой в пространстве E^n . В общем случае принцип соответственных состояний можно сформулировать в виде: для сложных систем и объектов может наблюдаться закономерность, когда различные состояния связаны с особо выделенными состояниями одинаково. Справедливость принципа в каждом конкретном случае проверяется по имеющимся экспериментальным данным.

Данный принцип позволяет построить шкалу для относительного сравнения состояний объектов между собой. Процедура построения таких шкал досконально проработана в термодинамике [8, 9]. Для примера воспользуемся соответствующей логикой построения шкал для комплексной оценки сходства объектов, исходя из представления пространств состояний в виде геометрических евклидовых пространств. В целом сущность метода заключается в выборе в пространстве E^n как опорного состояния M_0 , так и некоторого эталонного процесса.

Исходя из этого, построим шкалу для относительного сравнения состояний объектов следующим образом. Выберем некоторый линейный эталонный процесс l_0 , на линии которого отметим опорное состояние M_0 . На эталонном процессе отмечаем второе опорное состояние M'_0 и два указанных состояния соединяем прямой линией. Полученный отрезок делим на заданное количество одинаковых интервалов, например, 100, и устанавливаем длину полученных отрезков σ . Далее из начала координат проводим луч OM_0 и находим длину отрезка OM_0 . Шкалу измерений состояний объектов формируем в виде некоторого индекса θ применительно к лучу OM_0 с единицей измерения σ , при этом длина отрезка OM_0 в данной шкале измерений составит $\theta_0 = l_{OM_0}/\sigma$. Для определенности и формирования отличий от термодинамики назовем данный индекс θ менсурой (от лат. *mensura* – мера) и зададим соответствующую единицу измерения в виде градуса менсуры $^\circ M$, который геометрически будет равен длине σ . Теперь, проводя радиус-вектор \vec{r} до каждой опытной точки M_i и определяя его модуль $|\vec{r}|$, можно в полученной шкале измерить каждое состояние в градусах менсуры.

Длины отрезков в евклидовом пространстве будем определять исходя из известной метрики по формуле:

$$l_{ab} = \sqrt{(z_{1b} - z_{1a})^2 + (z_{2b} - z_{2a})^2 + \dots + (z_{nb} - z_{na})^2}, \quad (1)$$

где a и b – начало и конец некоторого отрезка ab .

Теперь для пространства E^n можно искать феноменологическую модель в виде уравнения состояния:

$$\theta = f\left(\frac{z_1}{z_{1_0}}, \frac{z_2}{z_{2_0}}, \dots, \frac{z_n}{z_{n_0}}\right). \quad (2)$$

Факт существования для объектов одного класса уравнения вида (3) должен подтверждаться имеющимися опытными данными. Если на основе этих данных получено качественное уравнение, то в этом случае можно говорить о справедливости принципа соответственных состояний. Это дает возможность эмпирического обоснования понятия менсуры, как особой функции, характеризующей состояния объектов в многомерном пространстве E^n . Исходя из уравнения (2), менсору можно определить как геометрическую меру отклонения состояния изучаемого объекта от опорного состояния, которое стандартизовано для определенного класса объектов.

Следует отметить, что для определения менсуры можно предложить различные методы измерения геометрических расстояний в пространстве E^n , например, относительно различных опорных точек, по отношению к выбранным плоскостям или линиям процессов и т.п. Можно также использовать различные метрики для оценки расстояний. Все это дает возможность предложить несколько разных систем для измерения состояний объектов. При этом общая задача сравнения состояний сводится к выбору наиболее оптимальной шкалы измерения (сравнения) состояний объектов.

Из сказанного выше следует, что при обосновании понятия менсуры используются методы построения измерительных шкал наподобие температурных шкал в термодинамике. Известно, что в термодинамике роль меры для относительного сравнения состояний термодинамических систем между собой выполняет особая функция, называемая температурой. Аналогичным образом, шкалу менсуры также можно представить как систему сопоставимых числовых значений геометрических величин для оценки состояний объектов в пространстве E^n .

Далее будем рассматривать менсору как эмпирическую меру W_θ применительно к опытным данным в пространстве E^n . Эта величина может отражать статику и динамику состояний как многомерных геометрических точек.

Примеры построения шкал и получения феноменологических моделей. Использование предложенных методов и зависимостей проиллюстрируем на примере получения уравнений состояний и зависимостей для оценки сходства биологических и социально-экономических объектов.

Биологические объекты.

Будем использовать базу данных AnAge [10] для получения уравнений состояний и соотношений для оценки сходства биологических видов. В качестве переменных состояния используем следующие величины из базы AnAge: максимальная продолжительность жизни в неволе z_1 , лет; вес взрослой особи z_2 , кг; уровень метаболизма z_3 , Вт.

В качестве первого опорного объекта (точка M_0) при построении линейной

шкалы менсуры выберем биологическое состояние вида домовая мышь (*Mus musculus*), которая является одним из самых многочисленных представителей млекопитающих и наиболее изученным модельным животным. Основные биологические показатели домовой мыши равны: $z_1 = 4$ лет; $z_2 = 0,0205$ кг; $z_3 = 0,271$ Вт. В качестве второй опорной точки M'_0 примем биологическое состояние вида серая крыса (*Rattus norvegicus*). Данный вид находится в стадии расцвета, распространен в антропогенной среде и разводится в большом количестве в качестве домашних и лабораторных животных. Биологические показатели серой крысы равны: $z_1 = 3,8$ лет; $z_2 = 0,300$ кг; $z_3 = 1,404$ Вт. При анализе данных будем использовать комбинации приведенных показателей видов из последовательности величин z_1, z_2, z_3 .

Построим прямую линию между состояниями M_0 и M'_0 , определим длину полученного отрезка согласно (1) и разобьем данный отрезок на 100 равных частей. В результате имеем эталон одного градуса $1^\circ M$, равный длине σ элементарного отрезка.

После выполненных операций, связанных с построением шкалы, было найдено значение менсуры для опорной точки M_0 , которое, например, для состояния, определяемого показателями z_1, z_2, z_3 , равно $338,62^\circ M$. Некоторые из полученных уравнений состояний для различных комбинаций показателей видов приведены в табл. 1. Коэффициенты множественной корреляции регрессионных зависимостей имеют высокие значения, что позволяет сделать вывод о справедливости принципа соответственных состояний для изучаемого класса объектов.

Социально-экономические объекты.

Будем использовать базу данных информации о состоянии и развитии городов России Федеральной службы государственной статистики [11]. На основе этого источника сформирован темпоральный массив данных, характеризующих состояние экономики, социальной и жилищно-коммунальной сферы городов с населением свыше 100 тыс. чел. (всего 154 города, без Москвы и Санкт-Петербурга). Для каждого города имеется информация по 63 основным социально-экономическим показателям в период времени с 2003 по 2015 годы (шаг один год). Для примера используем при анализе четыре показателя: численность населения Z_1 , тыс. чел.; объем товаров производства, выполненных работ и услуг собственными силами по виду экономической деятельности «Обрабатывающие производства» Z_2 , млн. руб.; оборот розничной торговли Z_3 , млн. руб.; объем работ, выполненных по виду деятельности «Строительство» Z_4 , млн. руб.

В связи с тем, что темпы развития городов зависят от количества населения и региональных особенностей, при анализе будем пользоваться удельными показателями вида $z_k = Z_k / Z_1$ (млн. руб./тыс. чел.). В качестве опорной точки M_0 примем условное состояние с минимальными значениями показателей $z_{k_0} = z_{k \min}$ в группе городов, которые наблюдались в 2003 году. Соответствующий условный объект, для которого наблюдались данные показатели, будем считать городом с населением 100 тысяч человек. В качестве эталонного процесса выберем процесс развития этого города, при этом считаем, что показатели, характеризующие его развитие в каждом году с 2003 по 2015 гг., изменялись линейно. В качестве второй опорной точки M'_0 примем состояние данного города в 2015 году с показателями также равными минимальным значениям этих величин.

Таблица 1. Уравнения состояния для биологических видов

Показатели видов	Кол-во видов	Значение θ в точке M_0 , °М	Уравнение состояния объектов	Коэффициент корреляции
z_1, z_2, z_3	546	338,62	$\theta = 323,45 \left(z_1/z_{10}\right)^{0,951} \left(z_2/z_{20}\right)^{0,064} \left(z_3/z_{30}\right)^{0,041}$	0,96
z_1, z_2	2456	1163,82	$\theta = 1096,6 \left(z_1/z_{10}\right)^{0,896} \left(z_2/z_{20}\right)^{0,101}$	0,95
z_2, z_3	545	23,23	$\theta = 20,23 \left(z_2/z_{20}\right)^{0,346} \left(z_3/z_{30}\right)^{0,564}$	0,99
z_1, z_3	531	351,96	$\theta = 344,85 \left(z_1/z_{10}\right)^{0,983} \left(z_3/z_{30}\right)^{0,085}$	0,97

Также как и в предыдущем случае, найдем эталон одного градуса ($1^\circ M$), равный длине σ элементарного отрезка. После выполненных операций было определено значение менсуры для опорной точки M_0 , которое, например, для состояния условного города, определяемого показателями z_2, z_3 равно $61,18^\circ M$. Некоторые из полученных уравнений состояний для различных комбинаций показателей приведены в табл. 2.

Таблица 2. Уравнения состояния для городов России

Показатели городов	Год	Уравнение состояния объектов	Коэффициент корреляции
z_2, z_3, z_4	2003	$\theta = 78,93 \left(z_2/z_{20}\right)^{0,670} \left(z_3/z_{30}\right)^{0,246} \left(z_4/z_{40}\right)^{0,058}$	0,97
z_2, z_3, z_4	2015	$\theta = 78,65 \left(z_2/z_{20}\right)^{0,778} \left(z_3/z_{30}\right)^{0,151} \left(z_4/z_{40}\right)^{0,051}$	0,98
z_2, z_3	2003	$\theta = 61,77 \left(z_2/z_{20}\right)^{0,716} \left(z_3/z_{30}\right)^{0,307}$	0,98
z_2, z_3	2015	$\theta = 61,06 \left(z_2/z_{20}\right)^{0,849} \left(z_3/z_{30}\right)^{0,168}$	0,99
z_2, z_4	2003	$\theta = 588,6 \left(z_2/z_{20}\right)^{0,899} \left(z_4/z_{40}\right)^{0,080}$	0,98
z_2, z_4	2015	$\theta = 726,4 \left(z_2/z_{20}\right)^{0,858} \left(z_4/z_{40}\right)^{0,098}$	0,98
z_3, z_4	2003	$\theta = 40,86 \left(z_3/z_{30}\right)^{0,836} \left(z_4/z_{40}\right)^{0,099}$	0,98
z_3, z_4	2015	$\theta = 31,96 \left(z_3/z_{30}\right)^{0,936} \left(z_4/z_{40}\right)^{0,064}$	0,99

Таким образом, использование предлагаемых принципов при моделировании состояний различных классов объектов позволяет получить уравнения состояний и сформулировать общие методические принципы обработки темпоральных данных для получения феноменологических закономерностей.

Выводы

Данный подход позволяет при моделировании состояний и процессов развития объектов применить математический аппарат и методики обработки данных, которые по своей сути близки к основным соотношениям и зависимостям термодинамики. Это дает возможность использовать апробированные методы при моделировании различных систем. Предложенный метод комплексного измерения состояний объектов использует принцип инвариантности расстояний в многомерных пространствах состояний по отношению к опорному состоянию и эталонному процессу. На основе этого могут быть разработаны шкалы измерений для относительного сравнения состояний различных

объектов между собой. При этом особо отметим, что на основе применения измерительных шкал между собой можно сравнивать только объекты одного класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверин Г.В. Системодинамика / Г.В.Аверин. – Донецк: Донбасс, 2014. – 405 с.
2. Звягинцева А.В. Вероятностные методы комплексной оценки природно-антропогенных систем / А.В.Звягинцева // Под науч. ред. д.т.н., проф. Г.В. Аверина. – М.: Спектр, 2016. – 257 с.
3. Аверин Г.В. О континуальном подходе к модельному представлению данных / Г.В.Аверин, И.С.Константинов, А.В.Звягинцева // Вестник компьютерных и информационных технологий, Вып.10. – 2016. – С. 47–52.
4. Звягинцева А.В. Интегрирование отдельных многомерных уравнений Пфаффа, имеющих важное прикладное значение / А.В.Звягинцева, Г.В.Аверин // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия «Математика. Физика», 27(248). Вып. 45. – 2016. – С.102–114.
5. Averin G.V. The Development of Multi-Dimensional Data Models Based on the Presentation of an Information Space as a Continuum / G.V.Averin, I.S.Konstantinov, A.V. Zviagintseva and O.A.Tarasova // International Journal of Soft Computing, 10(6). – 2015. P. 458–461.
6. Averin G.V. On Representation of Discrete Information of Temporal Databases in the Continuous Form / G.V.Averin, A.V.Zviagintseva, M.V.Shevtsova and L.N. Kurtova // Journal of Engineering and Applied Sciences. Volume: 12. Issue 15. – 2017. – P. 3884–3889.
7. Костенко Б.Б. История и актуальные проблемы темпоральных баз данных / Б.Б.Костенко, С.Д. Кузнецов. – 2007. URL: <http://citforum.ru/database/articles/temporal/> (дата обращения: 30 сентября 2017).
8. Гухман А.А. Об основаниях термодинамики / А.А.Гухман. – М., Энергоатомиздат, 1986. –383 с.
9. Робертс Д. Теплота и термодинамика / Д.Робертс / Пер. с англ. под. ред. Вукаловича М.П. – М., Изд. технико-теор. литературы, 1950. –592 с.
10. AnAge: The Animal Ageing and Longevity Database. Available at: <http://genomics.senescence.info/species/> (accessed October 5, 2017).
11. База данных Федеральной службы государственной статистики. 2017. URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 5 октября 2017).

Поступила в редакцию 09.02.2018 г.

SCALE CONSTRUCTION FOR COMPLEX OBJECTS CONDITIONS MEASURING IN MULTIDIMENSIONAL SPACES

G.V. Averin, A.V. Zviagintseva

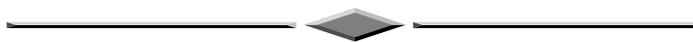
It is suggested to use known natural scientific principles for constructing measuring scales that allow to compare the one class complex objects states in multidimensional variable spaces. A method for complex measurement of states with respect to a reference state using the distance invariance principle was developed, as well as a technique for obtaining states equations in the phenomenological relationships form. This problem is relevant in the study of systems for which significant experimental data amounts are accumulated, which can be represented in the temporal arrays of quantitative information form. Using the biological species processing indicators example and cities socio-economic indicators, the procedure for developing a measurement scale for the objects states relative comparison is implemented. This allows us to formulate general methodological principles for processing temporal data to obtain phenomenological regularities. The proposed method in its essence is a logical development of the thermodynamics method with respect to different nature systems.

Keywords: complex systems; state variables; empirical measures; measurement scales; state equations.

Аверин Геннадий Викторович, доктор технических наук, профессор **Gennadiy V. Averin**, Doctor of technical sciences, Professor
E-mail: averin.gennadiy@gmail.com

Звягинцева Анна Викторовна, кандидат технических наук, доцент **Anna V. Zviagintseva**, Candidate of technical sciences, associate
E-mail: anna_zv@ukr.net

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ



УДК 621.396.4

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ МОБИЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В ИНФОКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ УГЛЕДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

© 2018 *И.А. Молоковский, И.Н. Яремко, В.Н. Лозинская*

Разработан метод определения координат подвижных объектов, учитывающий постоянно изменяющееся положение окружающего пространства очистного забоя угледобывающего предприятия. Данный подход учитывает технологические особенности процесса добычи полезных ископаемых. Предложенный метод позволяет повысить точность определения местоположения мобильных объектов.

Ключевые слова: метод; сеть; координаты; местоположение; мобильные объекты; угледобывающее предприятие.

Введение. В настоящее время существует множество различных инфокоммуникационных сетей: обычные сети предоставления информационных услуг населению, корпоративным предприятиям и сети специального назначения для применения на предприятиях с агрессивной средой. Для таких сетей, кроме обычных, предъявляются повышенные требования по искро- и взрывобезопасности, точности передачи информации в агрессивных средах. В данной работе рассмотрен метод определения местоположение мобильного объекта в инфокоммуникационной сети специального назначения для угледобывающей участка очистного забоя (лавы), являющегося наиболее опасным звеном в технологической цепи данных предприятий. В качестве мобильного объекта может выступать персонал, подвижное механическое оборудование и другие объекты, на которых закреплена радиометка.

Для работы персонала в подземной части угледобывающего предприятия, как и на многих других промышленных предприятиях, используются различные технологические системы связи. Соответствующая система в пределах подземной и поверхностной частей угледобывающего предприятия, а также между подземными рабочими станциями является жизненно необходимой для правильного функционирования любого угледобывающего предприятия. Налаженная работа технологической системы, расположенной в подземной части, является важным фактором концепции безопасности отрасли в целом. Решения будут приниматься быстрее и точнее, если быстрый и точный поток технологической информации автоматически и непрерывно будет поступать для управления.

Постановка проблемы. Точная оценка местоположения мобильных объектов в аварийной ситуации поможет быстрее найти персонал и оказать ему медицинскую помощь. Кроме того, дистанционный мониторинг и управление оборудованием в условиях подземного пространства позволят управленческому персоналу предотвращать несчастные случаи и другие производственные потери. Данный вопрос чрезвычайно важен, так как по данным Государственного комитета горного и технического надзора Донецкой Народной Республики только за 6 месяцев 2017-го года было травмировано 190 человек, в том числе 4 погибли.

Системы мониторинга подземной части угледобывающего предприятия с помощью различных компьютерных сетей уже были установлены на некоторых шахтах. В основном эти системы состоят из:

- датчиков, расположенных в стратегических местах (где существует необходимость контролировать параметры технологического процесса);
- ретрансляционных станций;
- средств передачи информации по проводным каналам связи.

Однако эти системы выполняют, как правило, только одну функцию – контроль состояния окружающей среды, заставляя угледобывающие предприятия устанавливать два и более комплекса, которые часто не согласуются друг с другом.

Основная часть. Для определения местоположения мобильного объекта необходимо определить его координаты. Предположим, что A представляет собой двух-, трехмерную область лавы (рис. 1), а $M \in A$. Используя стандартную систему координат, получаем, что

$$M = \left\{ \begin{array}{l} x, 0 \leq x \leq l_d \\ y, 0 \leq y \leq l_{\text{выем.поля}} \\ z, h_{\min} \leq z \leq h_{\max} \end{array} \right\}.$$

Положение мобильного объекта относительно координаты x определяется скоростью движения комбайна V_x , так как согласно технологическому процессу обслуживающий персонал находится на определенных местах относительно исполняющего механизма (комбайна):

$$V_x = dx/dt.$$

Расчетная скорость подачи комбайна не может быть выше максимальной, указанной в технической характеристике. Фактическая или эксплуатационная скорость подачи комбайна определяется путем хронометражных наблюдений в конкретном забое и является меньше расчетной, так как все факторы учесть в расчетах невозможно.

Окончательно скорость движения комбайна определяется из условия:

$$V_x = \min(V_n; V_{\text{крепл}})$$

где V_n – скорость подачи комбайна; $V_{\text{крепл}}$ – скорость крепления очистного забоя.

Отсюда,

$$x = \int \min[V_n(t); V_{\text{крепл}}(t)] dt. \quad (1)$$

Положение мобильного объекта относительно координаты y определяется скоростью движения очистного забоя V_y :

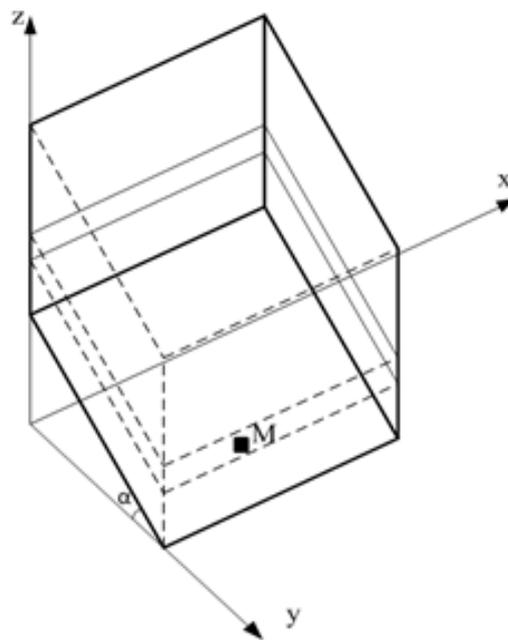


Рис. 1. Трехмерная модель выемочного поля

$$V_y = dy/dt.$$

Суточное продвижение очистного забоя определяется из соотношения:

$$V_y = A_{\text{сут}} / (l_d m \gamma c), \text{ м/сутки}$$

где $A_{\text{сут}}$ – нагрузка на очистной забой, т/сутки; m – мощность пласта, м; γ – плотность угля, т/м³; c – коэффициент извлечения угля из очистного забоя.

Получаем:

$$y = \int A_{\text{сут}} / (l_d m \gamma c)(t) dt. \quad (2)$$

Положения мобильного объекта относительно координаты z определяется скоростью движения очистного забоя V_z с учетом угла падения пластов:

$$V_z = dz/dt,$$

$$V_z = V_y \sin \alpha.$$

Таким образом:

$$z = \int V_y \sin \alpha dt. \quad (3)$$

Результатом (1), (2), (3) являются координаты мобильного объекта, которые определены относительно места положения в очистном забое:

$$M(x, y, z) = \left\{ \begin{array}{l} x = \int \min[V_n(t); V_{\text{креп}}(t)] dt \\ y = \int A_{\text{сут}} / (l_d m \gamma c)(t) dt \\ z = \int A_{\text{сут}} / (l_d m \gamma c) \sin \alpha(t) dt \end{array} \right\}.$$

Аналогично такой подход можно применить и к определению места положения считывателей, на которые поступает сигнал от конечного устройства. Пусть $S \in A$ является точка A , тогда координаты точки $S = (x_i, y_i, z_i)$.

$$S = f(l_{\text{лавы}}, h_{\text{кр}}, V_{\text{рез}}),$$

где $l_{\text{лавы}}$ – длина лавы; $h_{\text{кр}}$ – шаг крепления; $V_{\text{рез}}$ – скорость нарезки исполнительным механизмом комбайна.

Для определения координат точки S воспользуемся методом построения расчетных сеток с шагом: $x_i = x_{i-1} + h_{\text{кр}}$, $i = 1, 2, \dots, N_{\text{сек}}$.

Для условий конкретного очистного участка длина лавы $l_{\text{лавы}} = \text{const}$. Зная, что мобильный объект расположен в ограниченном пространстве, определить его местоположение можно только в пределах секции.

Количество секций определяем из следующего выражения:

$$N_{\text{сек}} = l_{\text{лавы}} / h_{\text{кр}},$$

На каждой секции расположен считыватель, на который будет поступать информация от оконечного устройства, расположенного в оборудовании мобильного объекта.

$$N_{сек} = N_{счит}.$$

Расстояние y_i в призабойном пространстве на протяжении длины очистного забоя может принимать два значения (y_{i2}, y_{i1}) и зависит от места расположения комбайна (рис. 2).

$$y_{i2} = y_{i1} + h_{мех}$$

где $h_{мех}$ - рабочий орган исполнительного механизма;

$l_{выем.поля} \leq y_{i1} \leq 0$ – значение y_{i1} изменяется в зависимости от местонахождения исполнительного механизма комбайна.

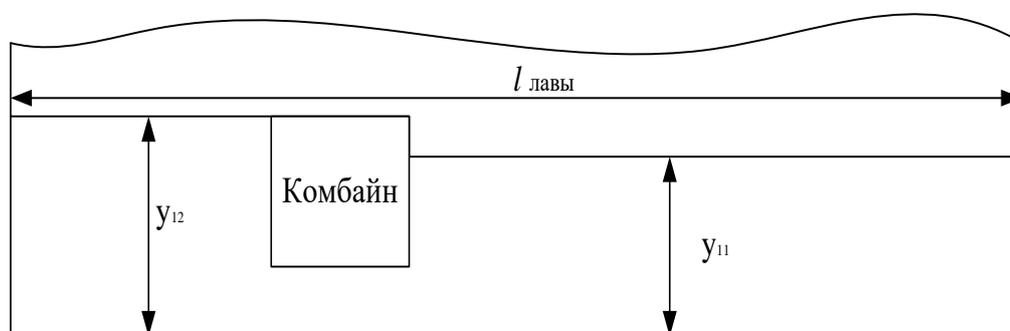


Рис. 2. Влияние местонахождение комбайна на значение y_i

Принимаем, что координата z остается условно постоянной, поскольку перемещение лавы вдоль пласта имеет незначительное отклонение.

Таким образом, получаем двухмерную расчетную сетку координат, в узлах которой расположены считыватели.

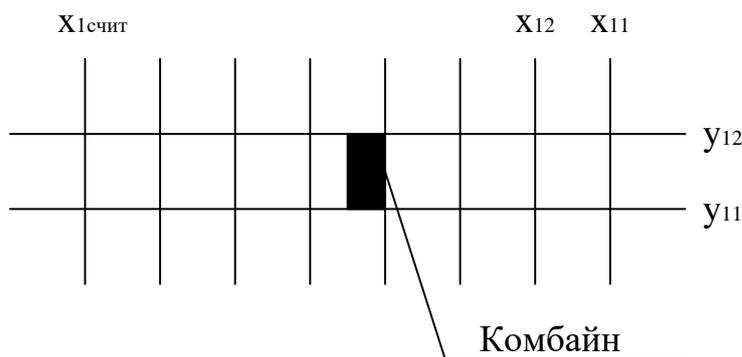


Рис. 3. Расчетная сетка координат считывателей

Зная количество считывателей, им может быть присвоен постоянный адрес. В зависимости от того, на какой считыватель поступает сигнал от конечного устройства, определяется место расположения мобильного объекта.

Для определения местоположения мобильного объекта целесообразно учитывать антропогенные особенности человека (средняя ширина плеч человека составляет примерно 0,6 м). Сигнал от конечного устройства будет поступать на несколько рядом расположенных считывателей одновременно.

Такой метод построения инфокоммуникационной сети специального назначения предусматривает использование беспроводной технологии передачи сообщений. Распространению радиоволн через уголь и пласты породы мешает дисперсия и рассеяние электромагнитных волн, и ограниченное пространство. Неоднородная комплексная структура угля и пластов породы усложняет процесс распространения радиоволн. Затухание сигнала зависит главным образом от диэлектрической проницаемости и удельной проводимости угольных слоев. Чтобы установить соответствующую систему радиосвязи в подземной части угледобывающего предприятия, очень важно изучить распространения радиоволн в выработке.

Выводы. Разработан метод определения координат мобильных объектов, учитывающий постоянно изменяющиеся параметры окружающего пространства очистного забоя угледобывающего предприятия. Предложенный метод позволяет повысить точность определения местоположения мобильных объектов. Предложенная модель учитывает технологические особенности процесса угледобычи.

Точность полученных результатов будет заключаться в количестве установленных считывателей для радиосигнала и расстояния между ними. Учитывая конструктивные особенности лавы в подземной части угледобывающего предприятия и антропогенные особенности человека, целесообразным устанавливаются считыватели на каждой крепи выемочного поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молоковський І.О. Аналіз систем промислового зв'язку [Текст] / І.О. Молоковський // Національна Академія наук України. Інститут проблем моделювання в енергетиці. Збірник наукових праць «Моделювання та інформаційні технології». Київ, 2009 р. – Випуск 52. – С. 157-160.
2. Молоковський І.А. Влияние окружающей среды на передачу радиосигналов в промышленных телекоммуникационных системах [Текст] / И.А.Молоковский // Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології». Лівадія: ДУІКТ, 2012 р. – С. 147-149.
3. Турупалов В.В. Информационная система обеспечения безопасности промышленных предприятий [Текст] / В.В. Турупалов // Науковий вісник Чернівецького університету «Комп'ютерні системи та компоненти. Збірник наукових праць. Том 3. Випуск 2 – Чернівці, 2012. – С. 65-68.
4. Турупалов В.В. Роль телекомунікаційних технологій у системах автоматизації підприємств гірничого-добувного комплексу [Текст] / В.В. Турупалов // Научно-теоретический журнал «Искусственный интеллект».- Донецк-2012. – №4. – С. 516-521.
5. Турупалов В.В. Повышение надежности технологических сетей связи [Текст] / В.В.Турупалов, И.А.Молоковский // Сучасні інформаційно-комунікаційні технології: VII Міжнародна науково-технічна конференція: збірник тез. – К., 2011. – С. 152–154.
6. Турупалов В.В. Специалізована телекомунікаційна мережа в системі управління вугільною шахтою [Текст] / В.В.Турупалов, Р.В.Федюк, В.О.Попов // Автоматика-2004: 11-я международная конференция по автоматическому управлению, 27–30 сентября 2004 г.: тезисы докл. – К, 2004. – Т. 4. – С. 113.
7. Молоковський І.А. Исследование возможности передачи информации с помощью беспроводных технологий в телекоммуникационных сетях промышленных предприятий [Текст] / И.А.Молоковский // Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета, серия: «Вычислительная техника и автоматизация-2010». Донецк, 2010 р. – Выпуск 19 (171). – С. 77-82.
8. Каличак М.Г. Режимы работы самоорганизующихся сетей в условиях промышленности [Текст] / М.Г. Каличак, И.А. Молоковский // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных трудов XVI научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке 25-26 мая 2016 г. – Донецк, ДонНТУ, 2016. – 341 с. – С. 17-18.

9. Молоковский И.А. Расчет основных параметров передачи данных в сетях промышленных телекоммуникаций [Текст] / И.А. Молоковский, В.В. Турупалов, Е.Г. Игнатенко // Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета, серия: Вычислительная техника и автоматизация – Донецк, 2012. -Выпуск 22 (200). – С. 115-119.
10. Савкин М. М. Распространение радиоволн в горных выработках [Текст] / М.М. Савкин // Радио-связь и высокочастотная телемеханика в горной промышленности: сб. науч. тр. / СО АН СССР. – Новосибирск, 1964. – С. 7–38.

Поступила в редакцию 23.01.2018 г.

MODEL OF MOBILE OBJECT LOCALIZATION IN INDUSTRIAL NETWORKS

I.O. Molokovskiy, I.N. Yaremko, V.N. Lozinskaya

Mobile objects localization model that takes into consideration mining factory's constantly changeable breakage face location is designed. This approach takes into consideration technology features of mining. Given model increases mobile objects localization fidelity.

Keywords: method; network; coordinates; location; mobile objects; coal mining company.

Молоковский Игорь Алексеевич

кандидат технических наук, доцент; ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, доцент кафедры «Автоматика и телекоммуникации»
e-mail: mia@domtu.org

Molokovskiy Igor Alekseevich

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor; State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University», Donetsk Assistant Professor at the Department of «Automation and Telecommunications»

Яремко Игорь Николаевич

кандидат технических наук, доцент; ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, доцент кафедры «Автоматика и телекоммуникации»
e-mail: igyaremko@gmail.com

Yaremko Igor Nikolayevich

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor; State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University», Donetsk Assistant Professor at the Department of «Automation and Telecommunications»

Лозинская Виктория Николаевна

кандидат технических наук; ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, доцент кафедры «Автоматика и телекоммуникации», E-mail: lvn_04@mail.ru

Lozinskaya Viktoriya Nickolaevna

Candidate of Engineering science; State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University», Donetsk Assistant Professor at the Department of «Automation and Telecommunications»

УДК 621.395.721.5:613.16

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕФОНА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

© 2018 *К.М. Тимошенко, В.В. Паслён*

В статье рассмотрено влияние излучения мобильного телефона на организм человека. Выполнено моделирование в ПП CST STUDIO SUITE простейшей модели головы человека с параметрами, близкими к реальным. Вычислены и наглядно представлены плотность мощности потерь и величина удельной поглощаемой мощности электромагнитного поля организмом человека. Выполнено сравнение полученных результатов с данными моделирования более точной модели головы, представленных отдельным проектом в ПП. Рассмотрена зависимость степени влияния электромагнитного излучения на организм человека от расположения мобильного телефона.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, организм человека, мобильный телефон, моделирование, удельная мощность поглощения.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Применение СВЧ волн в медицине чаще всего связано с положительным эффектом, который даёт локальный прогрев определённых частей человеческого тела. Это наиболее изученная сторона электромагнитного излучения, применяемая в медицинской практике. В то же время электромагнитное излучение носит и отрицательный характер, связанный с влиянием СВЧ поля на нейронные связи межклеточной структуры, а также ДНК. Указанный эффект, а также и другие аспекты медицинского и психологического воздействия СВЧ волн на человека находятся сейчас в поле экспериментальных исследований [1].

Широкое использование сотовой связи вызвало беспокойство о возможной вредности от электромагнитного поля, излучаемого телефоном. В различных странах принят стандарт ограничения степени воздействия на человеческий организм излучений сотового телефона. Эти стандарты обеспечивают спецификацию с точки зрения поглощения мощности на единицу массы, то есть, величину удельной поглощаемой мощности (Specific Absorption Rate), вызванной в голове пользователя при использовании мобильного телефона [2, 3].

При исследовании применялись точные и реалистичные модели головы и мобильного телефона с использованием соответствующих численных методов с целью наиболее точной оценки распределения SAR в голове человека. Соответствующий поставленной задаче программный продукт CST STUDIO SUITE позволил смоделировать и увидеть распределение SAR в голове человека. CST STUDIO SUITE – это программа трехмерного моделирования электромагнитных систем, которая позволяет использовать различные методы расчета электромагнитного поля (расчет переходного процесса во временной области, анализ в частотной области, метод нахождения собственных значений). Основной метод – расчет переходного процесса предоставляет возможность решать задачи исследования структур, возбуждённых радиоимпульсами, что отличает её от большинства других программных продуктов [4].

Целью исследования является построение модели взаимодействия человеческого тела с излучением СВЧ. Тело человека представляет собой диэлектрический материал с большими потерями, что в свою очередь, значительно усложняет решение электродинамической задачи. Но на данный момент, определение способов

уменьшения и расчет поглощаемой мощности телом человека при работе сотового телефона, является одной из приоритетных задач.

Основной метод расчета мощности, поглощаемой клетками головы пользователя, состоит в использовании специального режима вывода результатов расчета модуля электромагнитного поля: вдоль линии, пересекающей модель насквозь. В этом случае можно рассчитать зависимость модуля электромагнитного поля от удаления головы от антенны [4].

Изложение основного материала исследования. По определению [1], величина удельной поглощаемой мощности (*SAR – Specific Absorption Rate*) в объеме пространства равна мощности в этом объеме по отношению к весу этой части:

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad (1)$$

где σ – проводимость материала в данном объеме, См/м; E – напряженность поля, В/м; ρ – удельная плотность вещества, кг/м³.

Расчет мощности поглощения в голове пользователя мобильного телефона был выполнен на основании модели биологического объекта, состоящей из трех слоев: кожа, кость, мозги (табл. 1).

Таблица 1. Параметры трехслойной модели головы человека

Вещество	Толщина, мм	Радиус границы сферы, мм	Относительная диэлектрическая проницаемость	Проводимость σ , См/м	$\text{tg } \delta$	Теплопроводность Ст , Вт/град/м	Теплоёмкость H , кДж/град/кг	Плотность ρ , кг/м ³
Мозг		48	53 (для 0,9 ГГц) 46 (для 1,9 ГГц)	1.1 (1,7)	0,415 (0,369)	0,46	3,6	1030
Кость	3		9 (8)	0,06 (0,1)	0,133 (0,125)	0,41	1,3	1800
Кожа	1		59 (46)	1,3 (1,9)	0,44 (0,41)	0,293	3,5	1100

Для возбуждения структуры используется упрощённая модель излучающего устройства (рис. 1).

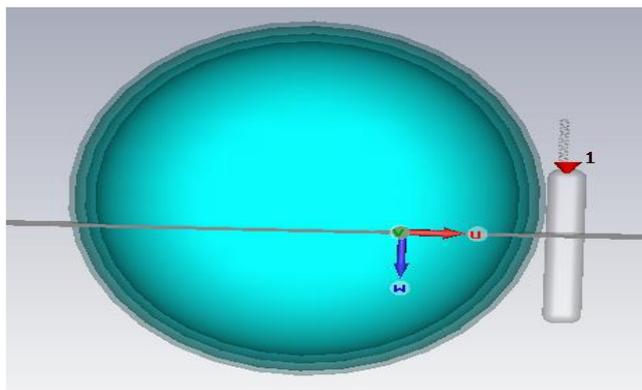


Рис. 1. Модели головы пользователя и источника излучения

После окончания переходных процессов можно видеть электрическое поле в пространстве расчета, а также плотность мощности потерь (рис. 2).

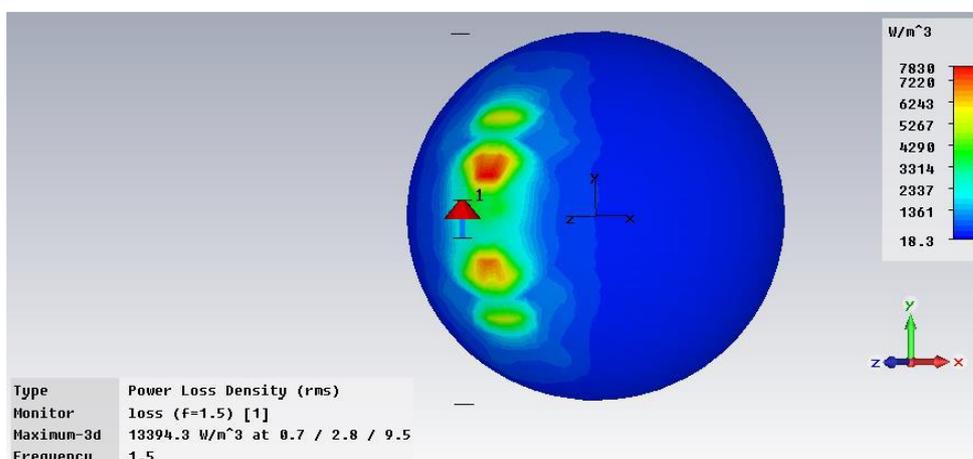


Рис. 2. Результаты расчета плотности мощности потерь

Плотность распределения по поверхности поглощаемой мощности на единицу веса представлена в трехмерном виде (рис. 3).

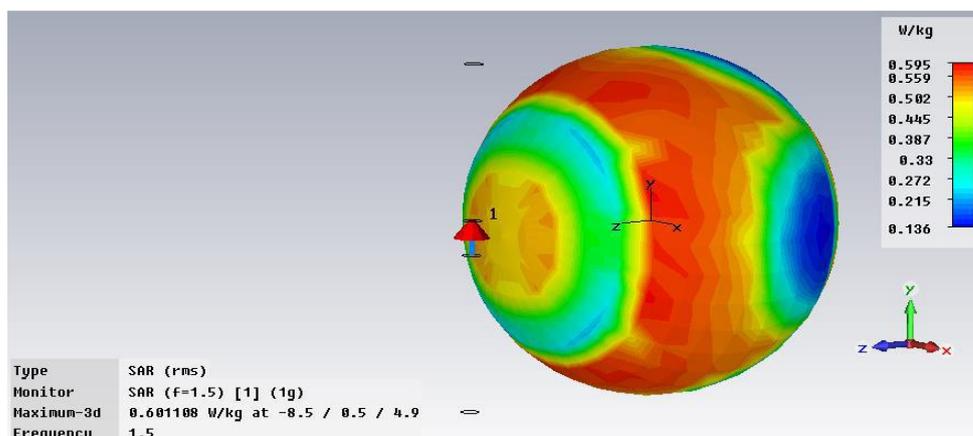


Рис.3. Распределение SAR по поверхности модели головы

Для сравнения представим уровень удельной поглощаемой мощности (SAR) модели головы и мобильного телефона (рис. 4) (стандартный проект ПО CST STUDIO SUITE).

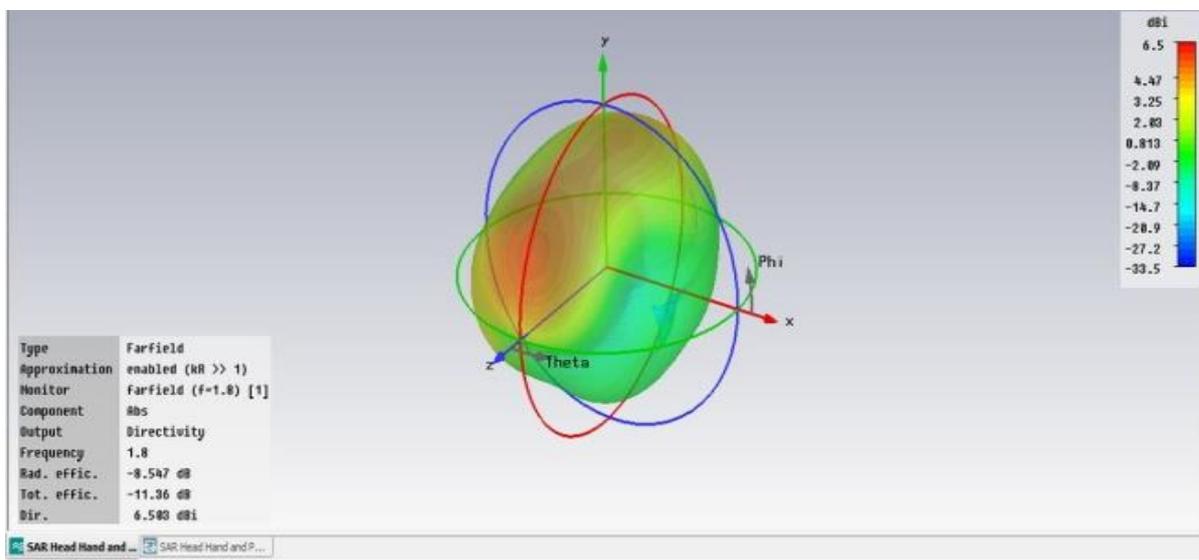


Рис. 4. Распределение SAR модели головы и мобильного телефона

Рассмотрим уровень удельной поглощаемой мощности (SAR) в зависимости от расположения излучающего устройства. На рис. 5 представлена ситуация, когда телефон расположен к голове вплотную.

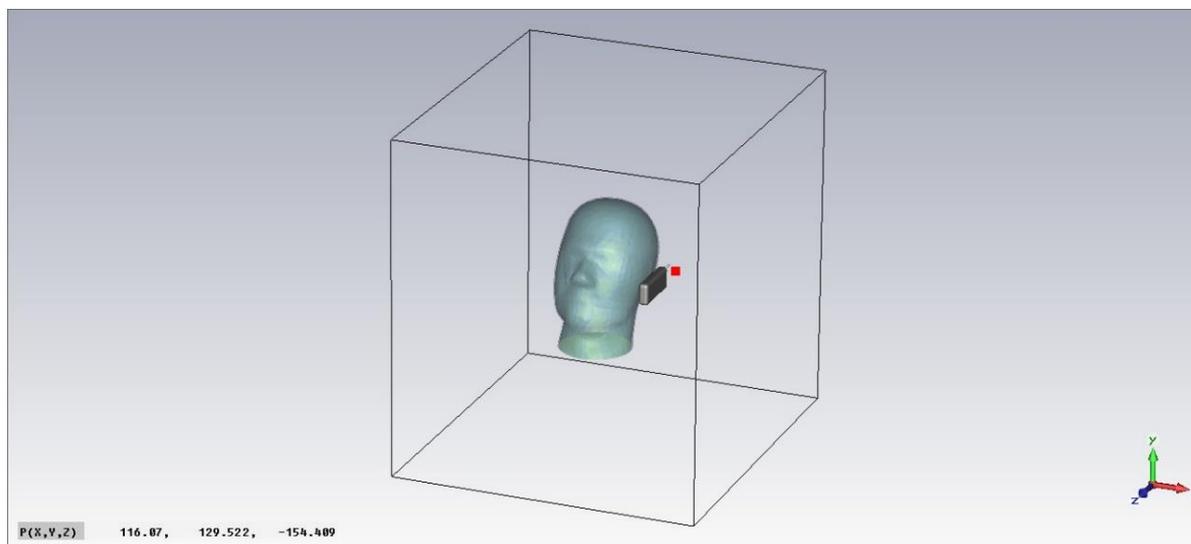


Рис. 5. Расположение излучателя (телефона) вплотную

После окончания переходных процессов можно видеть следующее распределение удельной поглощаемой мощности:

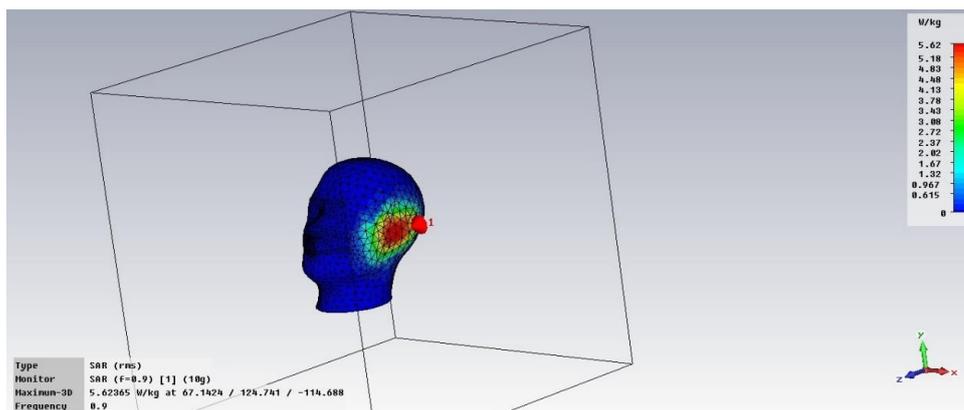


Рис. 6. Распределение SAR по поверхности модели головы

Переместим телефон на расстояние, равное приблизительно 15 см от головы человека (рис. 7):

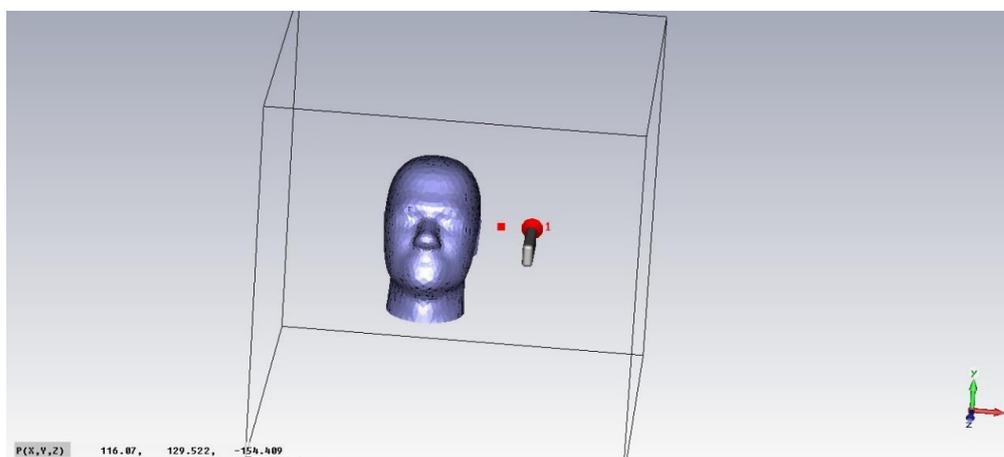


Рис. 7. Расположение мобильного телефона на удалении 15 см

После окончания переходного процесса можно видеть следующее распределение удельной поглощаемой мощности (рис. 8):

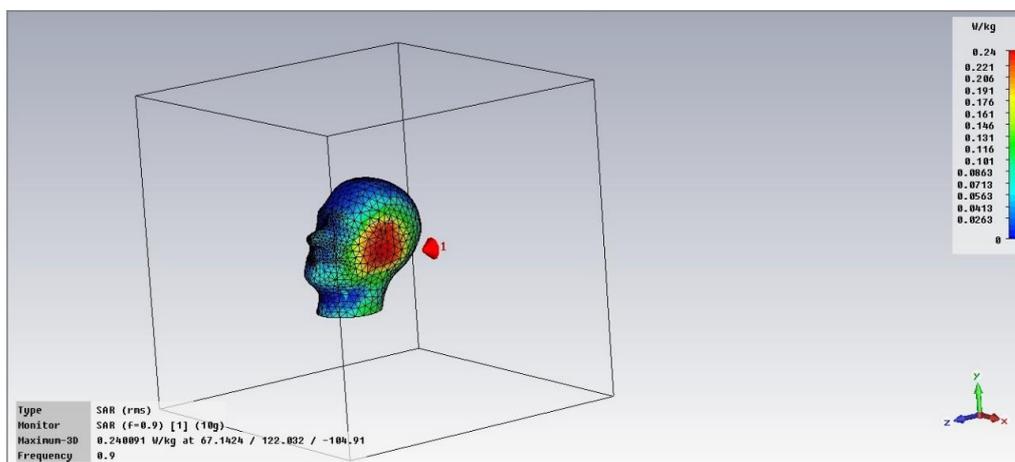


Рис. 8. Распределение SAR по поверхности модели головы при удалении на 15 см источника излучения

$$\frac{W_{1\max}}{W_{2\max}} = \frac{5,6}{0,24} \approx 23 \quad (2)$$

Анализ расчётов SAR (2) показал, что величина удельной поглощаемой мощности уменьшилась более чем в 20 раз после удаления мобильного телефона от головы человека.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. На основании результатов моделирования была определена степень влияния электромагнитного излучения сотового телефона на организм человека, а именно на его голову. Конечно же, представленная структурная модель упрощена, а математические расчёты ограничиваются только оценкой степени влияния на голову человека, но перечисленные недостатки не меняют суть проблемы. В будущем планируется использование различные программных продуктов моделирования с целью проверки адекватности и достоверности полученных результатов и более точного представления проблемы. Кроме того, планируется исследовать влияние излучения мобильного телефона на голову ребёнка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курушин А.А. Школа проектирования СВЧ устройств в CST STUDIO SUITE // А.А. Курушин. – М., ООО «Сам Полиграфист», 2014. – 433 с.
2. ICNIRP, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) (инструкции для ограничения изменяемых во времени электрических, магнитных и электромагнитных полей (до частоты 30 ГГц), Health Phys., 74, 494, 1998.
3. IEEE, IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz, in IEEE Standard C95.1 (стандарт IEEE для уровня облучения человека ЭМ поля 3 кГц - 300 ГГц), 1999.
4. Курушин А.А. Студия проектирования СВЧ устройств Microwave Studio. Книга для студентов и исследователей // А.А.Курушин, А.Н.Пластикова. – М., 2009. – 250 с.

Поступила в редакцию 15.02.2018 г.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE RADIATION OF THE MOBILE TELEPHONE ON THE HUMAN ORGANISM

K. Timoshenko, V. Paslyon

The article considers the influence of mobile phone radiation on the human body. Simulation in the CST STUDIO SUITE program is performed in the simplest model of the human head with parameters close to real ones. The power density of losses and the value of the specific absorbed power of the electromagnetic field by the human body are computed and clearly represented. The results obtained are compared with the modeling data of a more accurate head model, presented by a separate project in the program. The dependence of the degree of influence of electromagnetic radiation on the human body on the location of the mobile phone is considered.

Key words: electromagnetic radiation, human body, mobile phone, modeling, specific absorption power.

Тимошенко Ксения Михайловна, студентка 2-го курса магистратуры Донецкого национального технического университета факультета компьютерных информационных технологий и автоматизации специальности «Радиотехника», ДНР, Донецк

ksusha.smile@mail.ru

Донецк-8, ул. Добронравова, д.52, кв. 8

Timoshenko Kseniia Myhailovna,

Student of the 2nd course of the master's degree of the Donetsk National Technical University of the Faculty of Computer Information Technologies and Automatics of the specialty "Radio Engineering"

Телефон для контактов: (+38) 066-543-39-19
071-347-87-20

Паслён Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники и защиты информации Донецкого национального технического университета
ДНР, Донецк
paslen@ya.ru
Донецк-30, ул.Довженко, д.57а, кв. 37
071-340-46-15

Paslyon Vladimir Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radio Engineering and Information Protection of Donetsk National Technical University

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.67

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ИНВАРИАНТНЫЕ СИСТЕМЫ

© 2018 В.А. Гмыря, В.В. Данилов

Исследовано поведение оптических инвариантных систем (ОИС) осуществляющих преобразование сигналов, в качестве которых могут выступать и изображения. Предложено для математического описания ОИС ориентироваться на известные, в радиоэлектронике понятия коэффициента передачи и коэффициента пропускания.

Ключевые слова: оптические информационные технологии, линейные пространственно - инвариантные и частотно - инвариантные системы, модуляторы, фильтры.

Введение. В оптических информационных технологиях наиболее часто используются два класса инвариантных линейных систем: модуляторы (инвариантные сдвигам в частотной области) и фильтры (инвариантны к сдвигам в координатной области). Используя радиоэлектронную аналогию, утверждается, что для характеристики их удобно пользоваться понятиями коэффициента передачи и коэффициента пропускания. Это обусловлено тем, что эти характеристики не зависят от соответствующих сдвигов координатной и частотной областей.

Общие положения. Системы, осуществляющие линейное преобразование сигналов (изображений), предлагается называть линейными.

Пусть каждой линейной системе соответствует линейный оператор \hat{L} . Рис. 1а,б иллюстрирует понятия линейных пространственно - инвариантных и частотно - инвариантных систем.

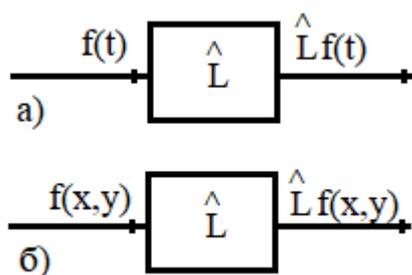


Рис. 1. Линейные системы, преобразующие сигналы: а - временная; б - пространственная

Сигналы как функция времени, обладают вместо пространственной инвариантности, только временной. При равенстве входного сигнала $f_1(t)$, предполагается, что выходной сигнал будет равен $f_2(t) = \hat{L}f_1(t)$ (рис. 2а). Инвариантная относительно смещения во времени система, передает без изменений любой временной сдвиг t_0 , так при входном сигнале $f_1(t-t_0)$, выходной будет определяться в виде $f(t-t_0) = \hat{L}f_1(t_0)$ (рис. 2б). Если спектры входного и выходного сигналов (рис. 2а)

равны $G_1(\omega)$ и $G_2(\omega)$, то спектры сигналов рис. 2б на основании теоремы запаздывания будут определяться в виде $G_1(\omega)e^{-i\omega t_0}$ и $G_2(\omega)e^{-i\omega t_0}$. Приведенные спектры зависят от t_0 , но их отношение является функцией только ω . Так например, коэффициент передачи, определяемый в радиоэлектронике в виде [1,2]:

$$K(\omega) = [G_2(\omega)\varepsilon^{-i\omega t_0}] / [G_1(\omega)\varepsilon^{-i\omega t_0}] = [G_2(\omega)] / [G_1(\omega)],$$

не зависит от t_0 . Тогда, система, инвариантная к сдвигам во времени, может быть охарактеризована коэффициентом передачи $K(\omega)$.

Процедура нахождения выходного сигнала для таких систем состоит в следующем:

– находим спектральную плотность входного сигнала $G_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t)e^{-i\omega t} dt$;

– определяем спектральную плотность выходного сигнала (рис. 3) $G_2(\omega) = G_1(\omega)K(\omega)$;

– определяем выходной сигнал $f_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G_2(\omega)e^{-i\omega t} d\omega$.

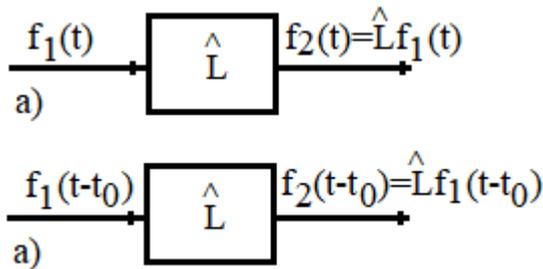


Рис. 2. Системы, инвариантные относительно сдвига во времени

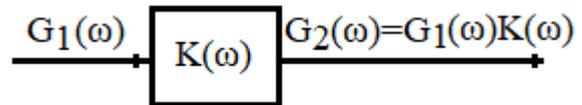


Рис. 3. Фильтр

В радиоэлектронике, примером рассмотренной системы являются линейные цепи с постоянными параметрами [1]. При зависимости сигнала от координат x и y , в виде $f_1(x, y)$, система, инвариантная относительно сдвигов по координатам, должна обладать следующими свойствами:

$$f_2(x, y) = \hat{L}f_1(x, y), \quad f_2(x - x_0, y - y_0) = \hat{L}f_1(x - x_0, y - y_0).$$

Спектральную плотность входного сигнала найдем в виде:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\xi - x_0, \eta - y_0) \exp(-i\omega_1 \xi - i\omega_2 \eta) d\xi d\eta = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x, y) \exp(-i\omega_1(x + x_0) - i\omega_2(y + y_0)) dx dy = \exp(-i\omega_1 x_0 - i\omega_2 y_0) G_1(\omega_1, \omega_2).$$

Подобным образом найдем спектральную плотность выходного сигнала $\exp(-i\omega_1 x_0 - i\omega_2 y_0) G_2(\omega_1, \omega_2)$, тогда коэффициент передачи можно представить в виде $K(\omega_1, \omega_2) = [G_2(\omega_1, \omega_2)] / [G_1(\omega_1, \omega_2)]$, который, как видно, не зависит от координат (x_0, y_0) .

Таким образом, системы, инвариантные к сдвигам в координатной области, модулируют спектр входного сигнала, причем закон модуляции определяется функцией $K(\omega_1, \omega_2)$; спектр выходного сигнала - $G_2 = G_1 K$. Пространство (слой), ограниченное параллельными плоскостями, заполненное однородной средой, может

служить примером такой системы. Предлагается системы инвариантные сдвигу в координатной области называть *модуляторами спектра или фильтрами*.

Линейные системы, инвариантные сдвигу по частоте. В случае, когда спектральные плотности входного и выходного сигналов известны, например $G_1(\omega)$ и $G_2(\omega)$, то при спектральной плотности входного сигнала $G_1(\omega - \omega_0)$ спектральная плотность выходного сигнала будет $G_2(\omega - \omega_0)$ (рис. 4).

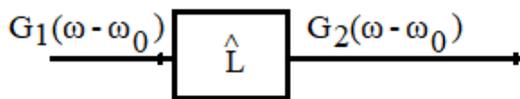


Рис. 4. Частотно-инвариантная система

Теоремой смещения определяются входной и выходной сигналы: $f_1(t)e^{i\omega_0 t}$ и $f_2(t)e^{i\omega_0 t}$. Они зависят от ω_0 , а их отношение является только функцией времени

$$T(t) = [f_2(t)e^{i\omega_0 t}] / [f_1(t)e^{i\omega_0 t}] = [f_2(t)] / [f_1(t)].$$

Функция $T(t)$ называется *коэффициентом пропускания* или *коэффициентом прозрачности*. Выходной сигнал можно найти исходя из выражения $f_2(t) = T(t)f_1(t)$.

Следовательно, эта система - модулятор, причем закон модуляции определяется коэффициентом прозрачности $T(t)$.

Следовательно, эта система - модулятор, причем закон модуляции определяется коэффициентом прозрачности $T(t)$.

В оптических информационных технологиях сигналы и коэффициент пропускания, это функции координат. *Модуляцию электромагнитной волны осуществляет линза*. Если поле на входе линзы $f_1(x, y)$, а ее коэффициент пропускания $T(x, y)$, то поле на выходе линзы $f_2(x, y) = f_1(x, y)T(x, y)$.

Импульсная характеристика системы. В радиоэлектронике, реакция фильтра на воздействие сигнала в виде дельта - функции называется импульсной характеристикой [1,2] (рис. 5). Она связана с $K(\omega)$, выражением $G_2 = G_1 K$. Следуя этому утверждению спектральная плотность δ - функции, равна $G_1 = 1$, тогда спектральная плотность импульсной характеристики есть коэффициент передачи.

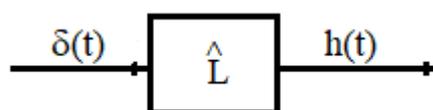


Рис. 5. Импульсная характеристика фильтра

Импульсная характеристика и коэффициент передачи связаны парой преобразований Фурье:

$$K(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)e^{-i\omega t} dt, \quad h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(\omega)e^{i\omega t} d\omega.$$

Не прибегая к определению коэффициента передачи, можно с помощью импульсной характеристикой, найти выходной сигнал,

$$\begin{aligned} f_2(t) &= 1/(2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} G_2(\omega) \exp i\omega x d\omega = 1/(2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} G_1(\omega) K(\omega) \exp i\omega x d\omega = \\ &= 1/(2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} G_1(\omega) \exp i\omega x \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \exp(-i\omega \tau) d\tau d\omega = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) [1/(2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} G_1(\omega) \exp i\omega(t - \tau) d\omega] d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) f_1(t - \tau) d\tau. \end{aligned}$$

Следовательно, $f_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) f_1(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} h(t - \tau) f_1(\tau) d\tau$. В радиоэлектронике, это выражение получило название интеграла Дюамеля [2]. В общем виде, оператор имеет вид $\hat{L} = \int_{-\infty}^{\infty} \{...\} h(t - \tau) d\tau$. Если сигнал описывается в двумерной системе координат, используют соответствующую функцию Дирака $\delta(x, y)$. В этом случае импульсная характеристика будет функцией x и y . Двумерный выходной сигнал, представим в следующем виде:

$$f_2(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\xi, \eta) f_1(x - \xi, y - \eta) d\xi d\eta = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x - \xi, y - \eta) f_1(\xi, \eta) d\xi d\eta.$$

Рассмотрим пространство (слой) между двумя плоскостями A и B шириной z (рис. 6).

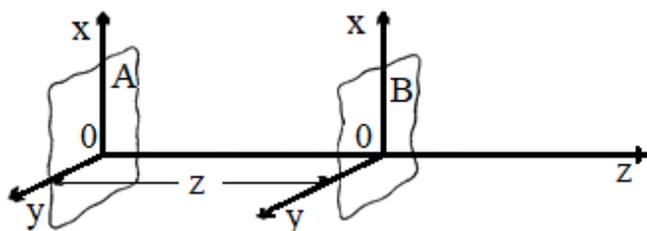


Рис. 6. Пространство (слой) между параллельными плоскостями

Коэффициент передачи этого пространства (слоя)

$$K(\omega_1, \omega_2) = \exp i \sqrt{k^2 - \omega_1^2 - \omega_2^2} z,$$

где $k = 2\pi / \lambda$ - волновое число. Импульсная характеристика пространства, заключенного между двумя плоскостями

$$\begin{aligned} h(x, y) &= 1/(2\pi)^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp i \sqrt{k^2 - \omega_1^2 - \omega_2^2} z \exp(i\omega_1 x + i\omega_2 y) d\omega_1 d\omega_2 = \\ &= -1/(2\pi) \cdot \frac{d}{dx} \cdot [\exp ik \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}] / [\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}] \end{aligned}$$

Используя интеграл Дюамеля, сделаем предположение, что если поле в плоскости A распределено по закону $f_1(x, y)$, то поле в плоскости B равно

$$f_2(x, y) = -1/(2\pi) \cdot \frac{d}{dz} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\xi, \eta) [\exp ik \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}] / [\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}] d\xi d\eta.$$

ИЛИ

$$\begin{aligned} f_2(x, y) &= kz/(2\pi i) \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\xi, \eta) [\exp ik \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}] / [\sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}] \times \\ &\times \{1 - 1/[k \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2}]\} d\xi d\eta. \end{aligned}$$

В случае достаточно большого z ($kz \gg 1$ или $z \gg \lambda/(2\pi)$), можно вторым слагаемым в квадратной скобке пренебречь. Получаем приближение определяющее поле в дальней зоне

$$f_2(x, y) = \frac{kz}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\xi, \eta) [\exp ik\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}] / [\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}] d\xi d\eta.$$

Если в плоскости A поле локализовано в небольшой области (по сравнению с z) и нас интересует поле в плоскости B также в небольшой области, то

$$\frac{1}{ik\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}} \approx \frac{1}{x^2} \text{ и}$$

$$f_2(x, y) = \frac{k}{2\pi iz} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\xi, \eta) e^{ik\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}} d\xi d\eta$$

Преобразуем показатель экспоненты:

$$ikz\sqrt{1 + \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{z^2}} \approx ik\left[1 + \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2z^2}\right] = ikz + \frac{ik}{2\pi} [(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2].$$

Тогда поле в выходной плоскости примет вид выражения:

$$f_2(x, y) = \frac{k}{2\pi iz} e^{ikz} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\xi, \eta) \exp[(ik/(2z))[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]] d\xi d\eta.$$

Получаемый интеграл представляет собой преобразование Френеля. Если поле в плоскости A занимает небольшой участок, то можно пренебречь ξ^2 и η^2 (приближение Фраунгофера) [9], а выражение описывающее поле в области Фраунгофера примет вид

$$f_2(x, y) = [k/(2\pi iz) \exp[ikz + \frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)]] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\xi, \eta) \exp[-i\frac{kx}{2z}\xi - i\frac{ky}{2z}\eta] d\xi d\eta.$$

Двойной интеграл, это преобразование Фурье. Поэтому поле в области Фраунгофера пропорционально спектральной плотности поля источника.

Фильтры. Линейную систему, инвариантную относительно сдвига по координатам, с коэффициентом передачи $K(\omega_1, \omega_2)$, в оптических информационных технологиях будем понимать как фильтр. Простыми фильтрами называют устройства, имеющие одну полосу пропускания и заграждения. В радиоэлектронике различают фильтры нижних частот (ФНЧ), верхних частот (ФВЧ), полосовые (ПФ) и заградительные (ЗФ). Область частот, в которой коэффициент передачи фильтра не равен нулю, называют полосой пропускания, остальная область частот - полоса заграждения. В полосе пропускания фильтра, стремятся, чтобы коэффициент передачи была величина постоянная. Частотой среза ω_c фильтра называют границу полос пропускания и заграждения. Фильтры низких и высоких частот имеют одну частоту среза. Полосовые и заградительные фильтры имеют две частоты среза ω_{c1} и ω_{c2} , при этом полоса пропускания или заграждения определяется разностью вида $\omega_{c1} - \omega_{c2}$.

Графики идеализированных функций, описывающие характеристики пропускания (заграждения) простых фильтров показаны на рис. 7. Реальные устройства не могут иметь таких характеристик.

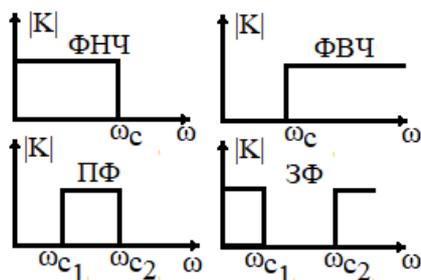


Рис. 7. Характеристики фильтров

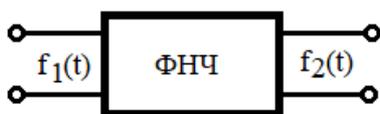


Рис. 8. Фильтр нижних частот на основе четырехполосника

Исследование простых идеализированных фильтров дает возможность выяснить влияние на искажение сигнала основного параметра устройства, полосы пропускания или заграждения. Влияние полосы пропускания фильтра нижних частот на сигнал исследуем с применением радиоэлектронной аналогии, четырехполосника (рис. 8).

При ширине спектра сигнала $f_1(t)$ меньше ω_c , сигнал не искажается. Если условие не выполняется, фильтр не пропускает высокочастотных составляющих, что приводит к искажению (сглаживанию) сигнала. При подаче на вход четырехполосника (рис. 8) сигнала вида $f_1(t) = 1(t)$, как уже известно, его спектральная плотность равна

$$G_1(\omega) = \frac{1}{i\omega} + \pi\delta(\omega) \quad [4]. \text{ Так как } G_1 = G_2 K, \text{ то}$$

$$f_2(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \left[\frac{1}{i\omega} + \pi\delta(\omega) \right] K_0 e^{i\omega t} d\omega = \frac{K_0}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \frac{\sin \omega t}{\omega} d\omega + \frac{K_0}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \frac{\cos \omega t}{\omega} d\omega + \frac{K_0}{2}$$

Исследуя полученное выражение видно, что под знаком второго интеграла находится нечетная функция времени. Несмотря на то, что подынтегральная функция обращается в бесконечность при $\omega = 0$, этот интеграл равен нулю, потому что его величина принята равной главному значению:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[\int_{-\varepsilon}^{\omega_c} (\cos \omega t / \omega) d\omega + \int_{\varepsilon}^{\omega_c} (\cos \omega t / \omega) d\omega \right].$$

При замене переменной $\omega = -x$ в первом интеграле, получим

$$\int_{-\omega_c}^{\varepsilon} (\cos xt / x) dx = - \int_{\varepsilon}^{\omega_c} (\cos \omega t / \omega) d\omega, \text{ и совместно со вторым интегралом получим нуль.}$$

$$\text{Тогда, } f_2(t) = (K_0 / 2) [1 + (2 / \pi) \int_0^{\omega_c t} (\sin \xi / \xi) d\xi] = (K_0 / 2) [1 + (2 / \pi) Si(\omega_c t)]. \text{ На рис.}$$

9а,б изображены графики интегрального синуса и выходного сигнала ФНЧ соответственно.

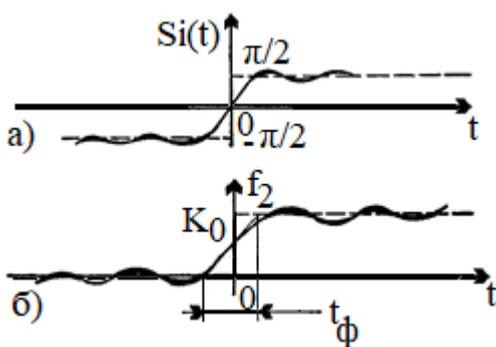


Рис. 9. Графики для интегрального синуса (а) и переходной характеристики ФНЧ (б)

Быстродействие фильтра в радиоэлектронике определяют по времени нарастание выходного сигнала (длительности фронта). Считая, что фронт нарастает по линейному закону, и учитывая, что

$$\left. \frac{df_2}{dt} \right|_{t=0} = (K_0 / 2) [(2 / \pi) \omega_c - (\sin \omega_c t) / (\omega_c t)] \Big|_{t=0} = \frac{K_0 \omega_c}{\pi}$$

получим $(K_0\omega_c/\pi)t_\phi = K_\phi$, откуда длительность фронта $t_\phi = 1/(2f_c)$. Откуда становится понятным, что чем шире полоса пропускания, тем круче фронт.

В оптических информационных технологиях аналогом рассмотренной характеристики является случай перехода от темного поля к светлому (рис. 10). Диафрагма, с отверстием вблизи оптической системы играет роль фильтра нижних частот.

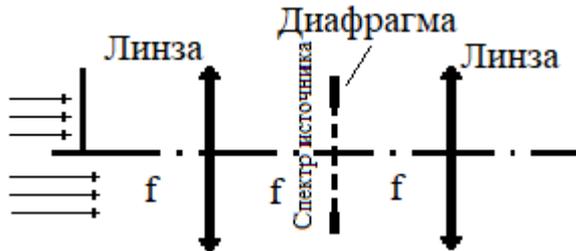


Рис. 10. Оптический аналог фильтра нижних частот радиоэлектроники

Представим входной сигнал в форме $f_1(t) = \delta(t) = df(t)/dt$, тогда вид выходного сигнала может быть найдена из условия $\frac{\omega_c t_n}{2} = \pi$, откуда $t_n = 1/f_c$.

В оптических информационных технологиях этот случай соответствует получению изображения точечного источника (рис. 11).

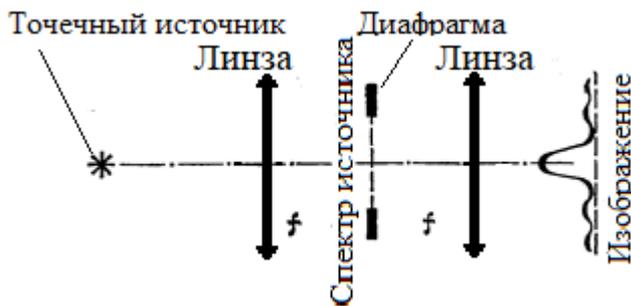


Рис. 11. Реакция оптического фильтра нижних частот на точечный излучатель

Условия физической реализуемости. В теории электрических цепей, физическая реализуемость занимает важное место. Она показывает, какие ограничения должны налагаться на частотные характеристики, чтобы осуществить цепь из физически реальных элементов, т. е. из индуктивностей, емкостей и активных сопротивлений. В цепи, удовлетворяющей условию физической реализуемости, вещественная и мнимая части

частотной характеристики взаимозависимы. Пусть известна входная проводимость некоего устройства $Y(\omega) = g(\omega) + ib(\omega)$, где $g(\omega)$ - вещественная, а $b(\omega)$ - мнимая части. Задача состоит в установлении связи между $g(\omega)$ и $b(\omega)$. В радиоэлектронике, в основе условия физической реализуемости лежит принцип причинности [2,3]. Четырехполюсник считается физически реализуемым, если его выходное напряжение $u_2(t)$ появляется не раньше входного $u_1(t)$. Если моментом включения входного напряжения считать $t=0$, то для физически реализуемого четырехполюсника $u_2(t) = 0$, при $t < 0$.

Допустим, что известна активная составляющая входной проводимости $g(\omega)$. Нахождение реактивной составляющей проводимости по известной активной составляющей проведем в соответствии с работой [4]. К элементу электрической цепи с проводимостью $Y(\omega)$ прикладывается напряжение, изменяющееся по закону δ -функции. Ток, протекающий по этому элементу, обозначим $j(t)$. Учитывая, что спектральная плотность δ -функции равна единице, спектральная плотность тока будет $Y(i\omega)$. Так как проводимость состоит из двух частей (вещественной и мнимой), ток $j(t)$ представим в виде суммы $j_g(t) + j_b(t)$. Учитывая, что следствие не может

наступить раньше причины, его вызвавшей, ток при $t < 0$ должен равняться нулю. Это условие будет достигнуто, если составляющая тока может быть определена в виде:

$$j_b(t) = j_g(t)[1(t) - 1(-t)] \quad (1)$$

В этом случае

$$j(t) = j_g(t) + j_g(t)[1(t) - 1(-1)] = 2j_g(t) \cdot 1(t). \quad (2)$$

Выражение вида (2.1) устанавливает связь между активной и реактивной частями проводимости, так как спектральными плотностями $j_b(t)$ и $j_g(t)$ являются $ib(\omega)$ и $g(\omega)$. Спектральная плотность функции $1(t) - 1(-1)$ равна $2/(i\omega)$. Учитывая теорему об умножении оригиналов [5], спектральная плотность $j_b(t)$ равна свертке функций $g(\omega)$ и $2/(i\omega)$, деленной на 2π :

$$j_b(\omega) = [1/(2\pi)] \int_{-\infty}^{\infty} 2g(x)/[i(\omega - x)]dx. \quad (3)$$

Входная проводимость, при этом, может быть представлена в виде:

$$Y(i\omega) = g(\omega) + [i/(2\pi)] \int_{-\infty}^{\infty} g(x)/(x - \omega)dx. \quad (4)$$

Выражение (4) получило название преобразования Гильберта и устанавливает связь между активной и реактивной составляющими входной проводимости. Несобственный интеграл, входящий в выражение (4) принимают равным главному значению [6]:

$$b(\omega) = -(1/\pi) \lim_{\substack{\varepsilon \rightarrow 0 \\ A \rightarrow 0}} \left[\int_{-A}^{\omega - \varepsilon} g(x)/(\omega - x)dx + \int_{\omega + A}^A g(x)/(\omega - x)dx \right]. \quad (5)$$

Решение, полученное с помощью преобразования Гильберта для входной проводимости, не является единственно возможным. К найденному значению $b(\omega)$ может быть добавлена проводимость любого физически реализуемого реактивного элемента. Полученная этим путем проводимость $Y(i\omega)$ удовлетворяет условию физической реализуемости.

Следовательно, существует бесчисленное множество электрических цепей с одинаковой вещественной и разными мнимыми частями проводимости. Несмотря на это, мнимые части не могут быть произвольными. Наименьшая величина мнимой части определяется преобразованием Гильберта. Если проводимость цепи определяется формулой (4), то это цепь минимальной реактивной проводимости. Активная часть также определяется с помощью преобразования Гильберта, когда реактивная часть проводимости $b(\omega)$ известна:

$$g(\omega) = (1/\pi) \int_{-\infty}^{\infty} b(x)/(\omega - x)dx. \quad (6)$$

Соотношения, подобные (3) и (6), справедливы и для входного сопротивления $z = R(\omega) + iX(\omega)$:

$$X(\omega) = (1/\pi) \int_{-\infty}^{\infty} R(x)/(x - \omega) dx, \quad R(\omega) = 1/\pi \int_{-\infty}^{\infty} X(x)/x - \omega dx.$$

Цепи, удовлетворяющие этим соотношениям, называются [1,2] *цепями минимального реактивного сопротивления*.

Для модуля и фазы коэффициента передачи цепи минимальной фазы могут быть установлены следующие зависимости:

$$\varphi(\omega) = (1/\pi) \int_{-\infty}^{\infty} \ln|K(x)|/(x - \omega) dx, \quad |K(x)| = (1/\pi) \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x)/(x - \omega) dx.$$

Условия физической реализуемости отражают причинную связь явлений, *развивающихся во времени*.

Тем не менее, в оптических информационных технологиях важна зависимость сигналов от пространственных координат. В дальнейших рассмотрении будет предполагаться, что сигналы в оптических информационных технологиях (ОИТ) изменяются во времени по гармоническому закону. Сигнал, изменяющийся по сложному закону, можно разложить на сумму гармонических колебаний, используя ряд или интеграл Фурье. Сигнал ОИТ на выходе пространственного фильтра зависит от его амплитудной и фазо- частотной характеристик. Для пространственных фильтров эти характеристики не зависят друг от друга, поэтому условия физической реализуемости в этом случае не применимы. Например, фазо-амплитудно-частотную характеристику – с помощью пластинки постоянной толщины и переменной прозрачности.

В некоторых специальных случаях соблюдение условий физической реализуемости для пространственных фильтров может оказаться важным. Так в оптических информационных технологиях, основанных на принципах голографии, их невыполнение ведет к появлению мнимого и действительного изображений предмета. Действительное изображение является лишним и его следует рассматривать как помеху.

Выводы. Показано, что, используя известные в радиоэлектронике понятия коэффициента передачи и связанные с ним импульсную и переходную характеристики, можно доказать, что оптические инвариантные системы являются линейными.

В оптических информационных технологиях сигналы и коэффициент пропускания, это функции координат. Модуляцию электромагнитной волны осуществляет линза. Если поле на входе линзы $f_1(x, y)$, а ее коэффициент пропускания $T(x, y)$, то поле на выходе линзы $f_2(x, y) = f_1(x, y)T(x, y)$.

Свободное пространство, заключенное между двумя параллельными плоскостями способно реализовать при определенных условиях, интегральное преобразование Френеля. Если поле входной плоскости слоя занимает небольшой участок, то слой пространства позволяет реализовать интегральное преобразование Фраунгофера.

Линейную систему, инвариантную относительно сдвига по координатам, с коэффициентом передачи $K(\omega_1, \omega_2)$, в оптических информационных технологиях предлагается понимать как фильтр.

Показано, что, как и в радиоэлектронике, физическая реализуемость линейной инвариантной оптической системы также может быть основана на принципе причинности явлений, развивающихся во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники // Под ред. Б. Х. Кривицкого. В 2-х томах. – Том 2. – М.: Энергия, 1977.
2. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники // Под ред. Б.Х. Кривицкого, В.Н. Дулина. В 2-х томах. – Том 1. – М.: Энергия, 1977.
3. Парыгин В.Н. Оптическая обработка информации / В.Н., Парыгин, В.И. Балакший. – М.: Изд-во Московского университета, 1987.
4. Литвиненко О.Н. Основы радиооптики / О.Н. Литвиненко. – К.: Техника, 1974.
5. Гудмен Д. Введение в Фурье оптику / Д. Гудмен // Перевод с англ., под ред. Г.И. Косоурова. – М.: «Мир», 1970.
6. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго // Перевод с франц. Под общ. Ред. К.С. Шифрина. – М.: Наука, 1965.

Поступила в редакцию 15.01.2018 г.

**OPTICAL INFORMATION TECHNOLOGY.
INVARIANT SYSTEM**

V.A.Gmyrya, V.V.Danilov

The behavior of the optical invariant systems (OIS) for converting signals, which can act and image. Proposed for the mathematical description of the OIS to focus on is known, in electronics the concept of transmission coefficient and transmittance.

Keywords: optical information technologies, linear space - invariant and frequency - invariant systems, modulators, filters.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор;
проректор по научной и инновационной деятельности ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк;
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor,
Vice-Rector of Research and Innovation Activity of
Donetsk National University, Donetsk

Гмыря Валерия Александровна

инженер кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк
ул. Университетская 24, Донецк, 83001
E-mail: radiophysik99@mail.ru

Gmyrya Valeria Aleksandrovna

engineer Department of physics and information and communication technologies
Donetsk National University,
24 University st., Donetsk, 83001

УДК 004.522

ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СРЕДА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ «COGNISPEECH»

© 2018 *Т.В. Шарий*

В статье описывается авторская инструментальная среда CogniSPEECH, позволяющая применять и исследовать различные методы параметризации речевого сигнала. Система предоставляет графические и текстовые интерактивные средства визуализации речевой информации. Предложена методология работы с комплексом, формирования словарей, настройки свободных параметров нечеткой когнитивной модели обработки речи и исследования их влияния на эффективность распознавания отдельных слов. Приведены результаты экспериментов по распознаванию голосовых команд управления мобильным роботом с помощью разработанной системы.

Ключевые слова: речевой сигнал; FCAS; MFCC; фонологический признак; фонема; сегментация.

Введение. Автоматическое распознавание речи (Automatic Speech Recognition, ASR) [1-3] остается на протяжении нескольких десятилетий одной из самых сложных и актуальных задач в сфере информационных технологий. Большинство современных операционных систем поставляются со встроенными модулями распознавания речи, а количество научных статей и бенчмарков, связанных с данной проблематикой, в сети интернет продолжает расти каждый год. Несмотря на огромные успехи статистических моделей, множество вопросов ASR остаются открытыми: построение робастных систем в условиях шума, распознавание речи при нарушениях дикции и т.д. Кроме того, ASR является неотъемлемым элементом передового направления IT-разработок – «больших данных» (Big Data and Data Science) и машинного обучения (Machine Learning) [2,3].

В настоящее время существуют программные решения для редактирования и обработки звука (в частности, и речи), среди которых следует отметить, в первую очередь, такие приложения, как: Adobe Audition, Audacity, SoundForge и Steinberg Cubase [4]. Перечисленные программы предоставляют широкий спектр возможностей по работе со звуком, включая различные фильтры и эффекты, визуализацию сигналов во временной и частотной областях и т.д. Тем не менее, они являются слишком универсальными и не предоставляют никаких концептуальных или технических механизмов добавления и исследования пользовательских методов параметризации и постобработки речевых сигналов. В связи со своей коммерческой направленностью, эти программы не слишком удобны для организации и проведения научных экспериментов. Таким образом, вопросы удобства визуализации, исследования и настройки систем обработки речи остаются по-прежнему актуальными.

Постановка задачи. Целью данной работы является создание инструментальной среды цифровой обработки и исследования речевых сигналов, а также демонстрация процесса построения тестовой системы распознавания голосовых команд на основе данного комплекса и анализ показателей ее эффективности. Для формирования фонемных моделей необходимо предоставить возможность подготовки и хранения соответствующих статистических данных от нескольких дикторов. В статье акцент делается, прежде всего, на разработке программной инфраструктуры для проведения экспериментов и создания систем распознавания голосовых команд в конкретных предметных областях. Материал статьи опирается на модели и методы параметризации и постобработки речевых сигналов, описание которых можно найти в [5-9].

Описание инструментальной среды CogniSPEECH. Система разработана в результате модульной декомпозиции и включает (рис.1): а) исследовательский модуль VisualSpeech.exe для анализа и редактирования речевых сигналов с удобным графическим интерфейсом; б) динамически подключаемую библиотеку DSP.dll, экспортирующую насыщенные математическими операциями процедуры и функции цифровой обработки речевого сигнала; в) модуль Phonemes.exe для обработки моделей звуковых образов фонем, формируемых исследовательским модулем. Связь между модулями системы осуществляется через файлы формата JSON с определенной фиксированной структурой.

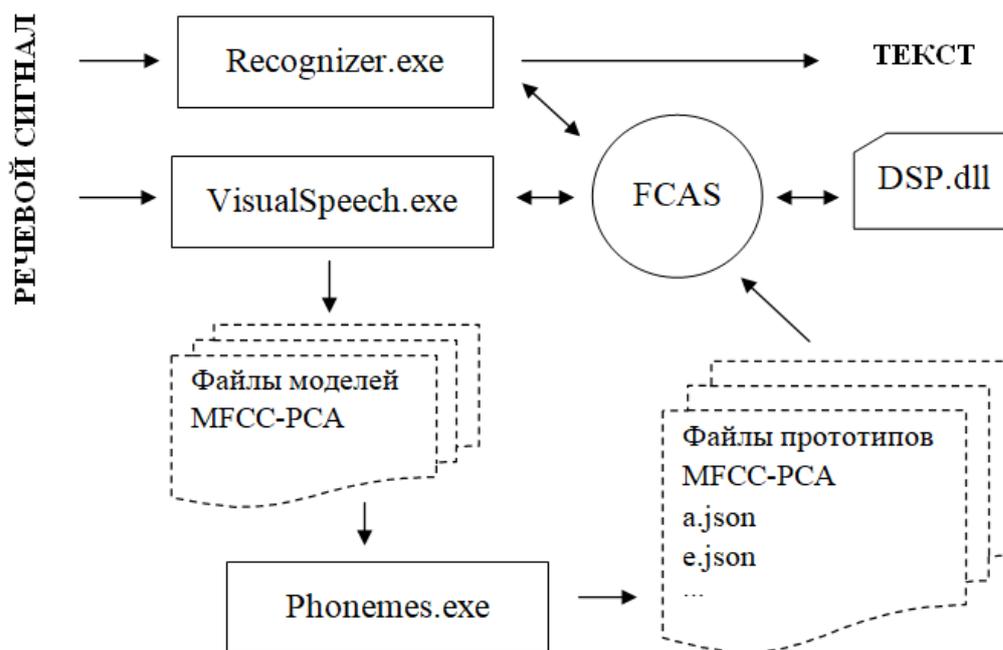


Рис.1. Архитектура комплекса CogniSPEECH

Центром всей инфраструктуры является модель FCAS (Fuzzy Cognitive Accented Speech) [5,6]. Ядро FCAS представляет собой сеть взаимосвязанных элементарных фонетических процессоров (ЭФП) признакового, фонемного и словесного уровней. ЭФП каждого слова аккумулируют выходные значения признаковых ЭФП, с которыми они связаны. Например, на активность ЭФП слова «ИЩИ» будут влиять признаковые ЭФП классов «Гласный», «Высокий», «Диффузный» (звук [и]) и «Шипящий» (звук [щ]) и фонемные ЭФП фонем [и] и [щ], состояние которых, в свою очередь, также зависит от признаковых процессоров. Распознанным полагается слово, ЭФП которого имеет максимальное выходное значение. Вычисления FCAS происходят с периодичностью оконного анализа речевого сигнала (20 мс). После автоматической фонемной сегментации в сигнале присутствуют маркеры границ фонем. Моменты времени, соответствующие данным границам, считаются моментами принятия фонемного решения. В эти временные срезы модель выдает степени соответствия звучавшего речевого сегмента всем фонологическим признакам. Для любого алгоритма сегментации характерен определенный процент лишних границ сегментов. С учетом механизмов накопления и убавления состояний ЭФП влияние этой ситуации уменьшается, т.к. соседние сегменты будут соответствовать одному признаку (с различными лишь, возможно, степенями соответствия). Кроме этого, модель FCAS

может выдать большую степень соответствия звуковому образу некоторой фонемы не только в момент принятия фонемного решения, но и в любой другой момент времени, что тоже будет обработано моделью. Таким образом, частично учитывается вторая проблема алгоритмов автоматической сегментации речевых сигналов – пропуск маркера сегментации. Полезным в модели FCAS является также учет фонетической статистики словаря предметной области – условных вероятностей появления фонологических признаков. В момент принятия фонемного решения все признаковые ЭФП, которые будут работать на следующем этапе (речевом сегменте), получают дополнительную активацию, в зависимости от текущего звука речи. Эта дополнительная активация пропорциональна условным вероятностям появления конкретного признака после текущего признака.

Связи между признаковыми и фонемными ЭФП являются активационными. Каждая связь имеет свой вес. Если фонема не обладает некоторым фонологическим признаком (например, фонема [к] не является звонкой), то значение соответствующего веса связи равно 0.0. В противном случае вес активационной связи равен вероятности корректного выделения фонологического признака. Данная статистика берется из признаковой модели FCAS и рассчитывается системой CogniSPEECH автоматически.

Выходом модели FCAS является последовательность текстовых символов. С выходом каждого фонемного ЭФП связан генерируемый им текстовый символ из алфавита фонем русского языка. В момент принятия фонемного решения сначала происходит вычисление величины скачка состояний ЭФП. Если это значение не превышает некоторого порога, то выход FCAS не изменяется (добавление нового символа к выходной последовательности не происходит). В противном случае, к выходной последовательности добавляется символ, генерируемый фонетическим процессором с максимальным накопленным состоянием. Затем все ЭФП производят сброс своих состояний (уменьшение значений пропорционально задаваемому исследователем коэффициенту). Таким образом, состояния ЭФП не обнуляются при переходе к обработке следующего речевого сегмента, что отражает свойства восприятия человеком речи и взаимовлияния соседних фонем [6]. Моменты принятия фонемных решений дополняются также теми моментами времени, когда выполняется условие большого скачка состояний ЭФП при большом весе сегмента. При этом к выходной последовательности символов также добавляется текстовый символ, генерируемый фонемным ЭФП с максимальным накопленным состоянием.

Таким образом, в модели ядра FCAS присутствует множество свободных параметров, и разработанная инструментальная среда позволяет исследователю задавать эти параметры и изучать поведение всей модели распознавания.

В диаграмме вариантов использования инструментальной среды CogniSPEECH присутствуют три агента:

1) эксперт-фонолог, работающий с готовыми звуковыми файлами с речью и / или диктующий слова в микрофон. Основные возможности, предоставляемые системой для данного агента: спектральный и кепстральный анализ речевого сигнала; сегментация методами «v/c/p», «STM» и «STM+CSM» [7]; взвешивание речевых сегментов [5,9]; выделение частоты основного речевого сигнала [9]; расчет акустических характеристик признакового блока FCAS и определение степеней принадлежности выделенного звука нечетким множествам признаковых классов Вайрена-Штубса [8], а также эмуляция работы ядра FCAS;

2) эксперт-статистик, занимающийся обработкой моделей звуковых образов фонем MFCC-PCA (будут описаны далее), сформированных исследователем на основе

кепстральных и амплитудно-временных характеристик сегментов речевого сигнала. Для этого система предоставляет возможности отбора и визуализации моделей, анализа главных компонент (Principal Component Analysis, PCA);

3) конечный пользователь системы, работающий с готовыми звуковыми файлами с записанной речью и/или диктующий слова в микрофон. Система отображает пользователю распознанные команды.

Исследовательский модуль VisualSpeech представляет собой инструментальную среду анализа и редактирования речевых файлов. Главное окно программы приведено на рис.2.

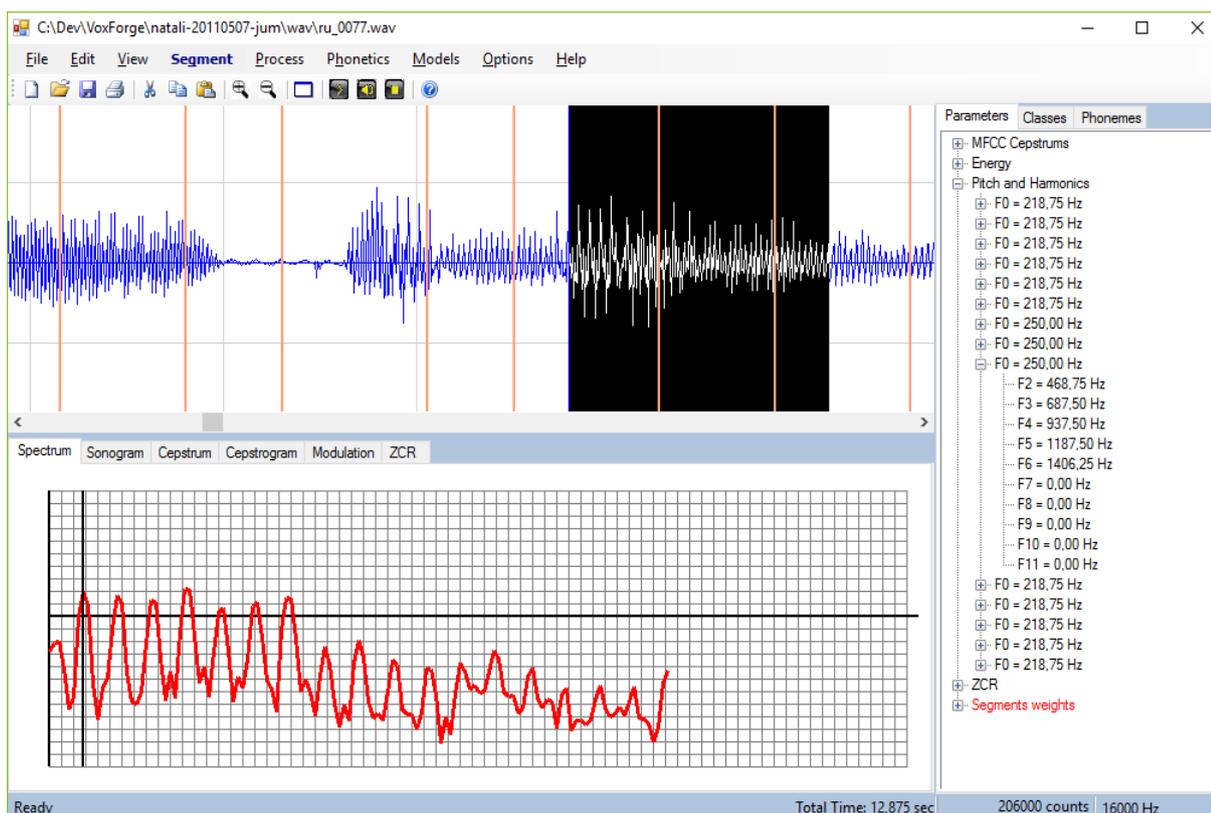


Рис.2. Главное окно модуля VisualSpeech

Программа предоставляет два способа ввода входной аудиальной информации: ввод с микрофона и открытие файла с записанной речью. Параметры сигнала при захвате с микрофона устанавливаются следующие: частота дискретизации – 16000 Гц; число каналов – 1 (моно); количество бит на отсчет – 16. При работе с речевыми файлами доступны два формата: WAV и MP3. Если в WAV-файле содержится информация двух каналов, то обрабатывается только первый канал. Для декодирования MP3-файлов программа использует библиотеку LAME [10]. Декодированный сигнал имеет те же характеристики, что и захватываемый с микрофона.

При открытии звукового файла в статусной строке окна программы отображаются основные характеристики сигнала: общее время звучания, количество отсчетов, частота дискретизации, количество каналов (моно или стерео). Верхняя панель VisualSpeech служит для визуализации речевого сигнала (амплитудно-временное представление). Для анализа конкретного участка сигнала необходимо выделить мышью данный отрезок. В нижней панели VisualSpeech можно просмотреть спектр Фурье (в обычном и

логарифмическом представлении), спектрограмму, MFCC-кепстр [1], MFCC-грамму, спектр модуляции и кривую динамики энергии и коэффициента частоты переходов уровня сигнала через ноль (Zero Crossing Rate, ZCR) в выделенном отрезке сигнала. Правая панель VisualSpeech содержит три вкладки: «Statistics», «Classes», «Phonemes». В первой вкладке отображается статистика параметров сигнала: конкретные значения коэффициентов MFCC-кепстра, их среднее по фреймам, минимальные и максимальные значения; энергия и коэффициент ZCR; частоты основного тона и гармоник. Если произведена ручная или автоматическая сегментация сигнала (выбран пункт меню «Segment»), то отображаются также веса сегментов. Во второй вкладке отображаются данные нечеткой признаковой классификации – степени соответствия текущего сегмента признаковым классам Вайрена-Штубса [5,8]. Третья вкладка позволяет формировать модели фонем. Список из 22 признаков и 25 фонем, с которыми работает система CogniSPEECH, приведен в табл.1.

Таблица 1. Признаковые классы и фонемы, обрабатываемые системой CogniSPEECH

Класс	Обозначение в CogniSPEECH	Фонемы класса	Класс	Обозначение в CogniSPEECH	Фонемы класса
Звонкий	Звн	Все нешумовые + шумовые	Компактный высокий	КомВ	[э]
Глухой	Глх	[п], [т], [к], [с], [ш], [ф], [х]	Диффузный низкий	ДифН	[у]
Нешумовой	Неш	[а],[о],[у], [и],[ы],[э], [л],[р],[м],[н]	Компактный низкий	КомН	[а], [о]
Шумовой	Шум	[б], [д], [г], [з], [ж], [в]	Плавный	Плав	[л], [р]
Звонкий шипящий	Шип	[з], [ж], [в]	Носовой	Нос	[м], [н]
Гласный	Глас	[а], [о], [у], [и], [ы], [э]	Звонкий взрывной	ЗвВзр	[б], [д], [г]
Сонорный	Сон	[л], [р], [м], [н]	Высокий	Выс	[э], [и], [ы]
Взрывной шипящий	ВзШип	[с], [ш], [щ], [ч]	Низкий	Низ	[а], [о], [у]
Глухой шипящий	ГлШип	[с], [ш], [щ], [ч], [ф], [х]	Класс «С»	С	[с]
Взрывной глухой	ГлВзр	[п], [т], [к]	Класс «ШЧ»	ШЧ	[ш], [щ], [ч]
Диффузный высокий	ДифВ	[и], [ы]	Класс «Ф, Х»	ФХ	[ф], [х]

В верхней части вкладки, в выпадающем списке, задается тип голоса диктора (диапазон частоты основного тона), для которого формируется модель фонемы:

- «Low [80-150 Hz]» (низкие голоса, преимущественно мужские);
- «Medium [151-250 Hz]» (средние голоса, высокие мужские и низкие женские);
- «High [251-450 Hz]» (высокие, преимущественно женские голоса).

Таким образом, в системе формируются отдельно модели фонем для трех различных типов голосов. Модели и прототипы фонем хранятся в директории DATA программного комплекса, в JSON-файлах с соответствующими именами (например, a.json, e.json и т.д.).

При выборе пункта меню «Phonetics» появляется вторая форма интерфейсного модуля, содержащая четыре вкладки: «Wiren-Stubbs Classes», «Jacobson Classes», «FCAS», «Statistics». В первой вкладке отображаются результаты нечеткой классификации выделенного речевого сегмента по схеме Вайрена-Штубса [8]. Во второй вкладке отображаются результаты нечеткой классификации выделенного речевого сегмента по признакам Якобсона. Третья вкладка (рис.3) предназначена для эмуляции работы модели FCAS с исследуемым речевым сигналом. Здесь исследователю предоставляются удобные возможности пошаговой эмуляции и просмотра состояний и выходных значений всех ЭФП признакового и фонемного уровня ядра FCAS. Кроме того, в панели «FCAS Parameters» можно задавать свободные параметры FCAS непосредственно во время эмуляции и отслеживать, таким образом, их влияние на процесс распознавания. Четвертая вкладка формы предназначена для автоматического анализа и вывода фонетической статистики – вероятностей появления фонем и признаков в речевом сигнале и условных вероятностей следования фонем и признаков. Словарь предметной области задается в текстовом файле формата JSON.

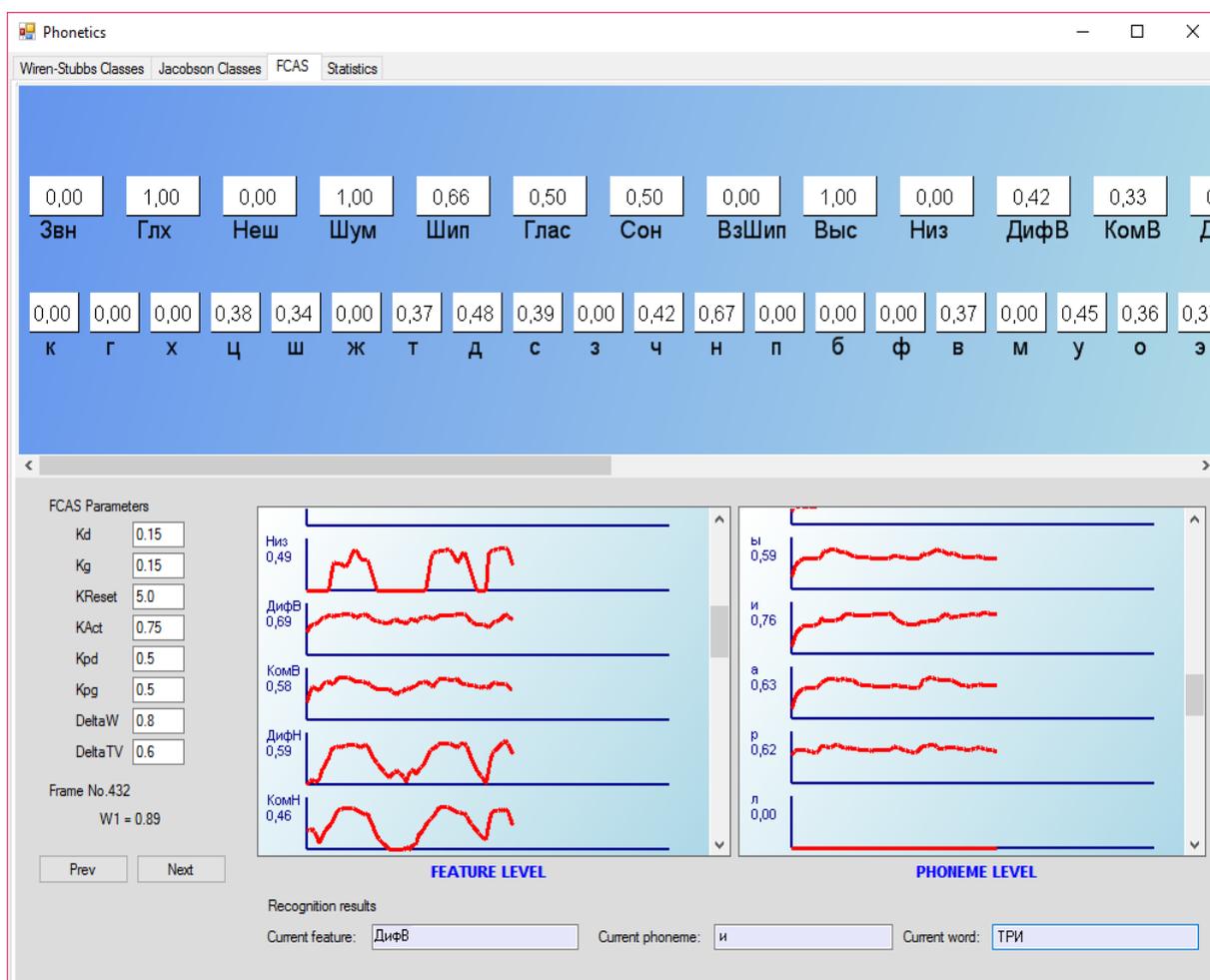


Рис.3. Окно эмуляции работы ядра FCAS

Динамически подключаемая библиотека DSP.dll экспортирует математические функции цифровой обработки речевых сигналов, применяемые в исследовательском и пользовательском модулях. Реализованы функции быстрого преобразования Фурье,

MFCC, взвешивания сигнала окном Хемминга, расчета энергии участка сигнала и коэффициента ZCR, выделения частоты основного тона [5,9].

Вспомогательный модуль Phonemes предназначен для статистической обработки моделей фонем, формируемых экспертом в исследовательском модуле. Программа позволяет провести статистическую обработку, анализ главных компонент, просмотреть результаты, построить MFCC-PCA прототип звукового образа фонемы на основе векторов главных компонент либо усредненных векторов MFCC, сохранить сформированный прототип в json-файле для обращения к нему со стороны модуля VisualSpeech или любых других программ. Прототипы фонем строятся следующим образом. Система CogniSPEECH вычисляет в окнах анализа 16-мерные векторы мел-кепстральных коэффициентов и добавляет к вектору признаков коэффициент энергии и ZCR фрейма. Затем производится анализ главных компонент с целью выявления номеров коэффициентов, вносящих наибольший вклад в дисперсию всех признаков фонем. После отбрасывания 6 наименее значащих номеров оставшиеся номера коэффициентов образуют новый 12-мерный базис, на который проецируются все векторы фонем, а также их прототипов.

Пользовательский модуль Recognizer работает в двух режимах: «распознавание слова» и «поиск слова». Программа предоставляет два способа ввода входной аудиальной информации: ввод с микрофона и открытие файла с записанной речью. При этом выводится информация о типе голоса диктора как частоте основного тона, громкости и темпе речи, а также список наиболее вероятно прозвучавших слов (в режиме поиска – позиции слов, найденных в файле).

Информационная технология распознавания голосовых команд управления мобильным роботом. Информационная технология распознавания голосовых команд основывается на моделях и методах, предложенных в [5-9] и реализованных в программном комплексе CogniSPEECH. Создание системы распознавания команд управления мобильным роботом с помощью комплекса CogniSPEECH включает следующие этапы:

1) программирование сети FCAS. Программный код комплекса CogniSPEECH изначально содержит структуры для представления всех признаков и фонемных ЭФП, а также массив связей между ними. Эксперт инициализирует этот массив конкретными значениями весов. Используемые в системе распознавания команд управления мобильным роботом веса связей приведены в табл.2. Также эксперт выставляет все свободные параметры ядра FCAS.

Таблица 2. Веса связей между признаковыми и фонемными ЭФП модели FCAS в системе распознавания команд робота

Признак	ж	щ	т	д	с	н	ч	п	в	о	э	ы	и	а	л
ДифН	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0
ДифВ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0.9	0	0
КомН	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0.9	0
КомВ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сон	0	0	0	0	0	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0.7
ЗвВзр	0	0	0	0.7	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0	0	0
ЗвШип	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ГлВзр	0	0	0.8	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0
С	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ШЧ	0.8	0.9	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0	0	0	0	0
ФХ	0	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0	0	0	0	0	0

2) создание текстового файла с набором распознаваемых команд и его загрузка в систему в окне «Phonetics / Statistics». Лексикон предметной области телефонных номеров включает следующие слова: «Наверх», «Вниз», «Влево», «Вправо», «Ищи», «Стоп», «Ожидай», «Развернись». Инструментальный комплекс CogniSPEECH автоматически рассчитывает условные вероятности следования друг за другом признаков и фонем для загружаемых словарей;

3) для каждого слова эксперт дополнительно создает структуры для соответствующих словесных ЭФП. Массив связей между признаковыми, фонемными и словесными ЭФП также программируется и инициализируется экспертом. Эти связи нужны для вычислений ядра FCAS.

С помощью модулей VisualSpeech (вкладка Phonemes/Add This Model) и Phonemes (меню Data/Export) эксперт может в любой момент пополнять базу образов фонем после выделения фрагментов речевого файла.

В результате выполнения описанных выше операций, формируется код модели FCAS. Фрагмент сети показан на рис.4 (активационные связи между ЭФП с нулевым весом в программной реализации игнорируются). Система компилируется, после чего можно использовать программу Recognizer для распознавания команд управления мобильным роботом и программу VisualSpeech для эмуляции и исследования созданной модели.

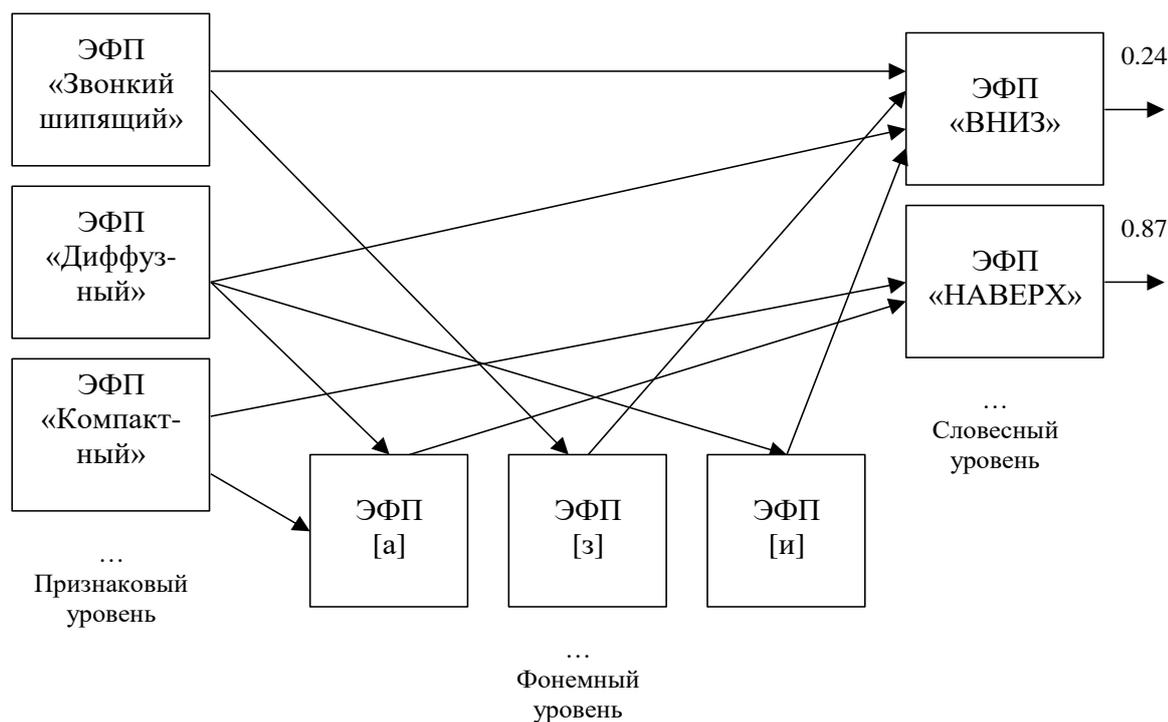


Рис.4. Фрагмент сети FCAS для словаря мобильного робота

Компьютерный эксперимент по распознаванию команд управления роботом.

Целью эксперимента являлся анализ эффективности системы, построенной на базе CogniSPEECH, и исследование влияния параметров модели FCAS на точность распознавания на примере словаря мобильного робота. В эксперименте принимали участие 4 диктора – 2 диктора с голосами из диапазона «Low [80-150 Hz]» и 2 диктора с

голосами из диапазона «Medium [151-250 Hz]». Каждый диктор произнес каждое слово из словаря по 30 раз.

Результаты эксперимента приведены в табл.3. Помимо традиционного показателя процента неверно распознанных слов (Word Error Rate, WER) и количества не распознанных (D) и неверно распознанных слов (S), в таблице указаны также средние значения выходов (Y_{out}) соответствующих словесных ЭФП и средняя разница с ближайшим по значению выходом другого ЭФП (ΔY).

Таблица 3. Статистика распознавания отдельных команд робота

Слово	D	S	WER	Y_{out}	ΔY
Наверх	0	4	3.3	0.8	0.27
Вниз	0	7	5.9	0.82	0.31
Влево	4	9	10.8	0.76	0.12
Вправо	0	8	6.7	0.77	0.17
Ищи	0	2	1.7	0.91	0.4
Стоп	2	4	5	0.84	0.35
Ожидай	0	4	3.3	0.81	0.28
Развернись	0	4	3.3	0.82	0.3

Экспериментально были подобраны следующие параметры FCAS, обеспечивавшие наилучшую точность распознавания в рассмотренном эксперименте: $K_d=0.15$ (коэффициент забывания для ЭФП признакового уровня в формуле операции забывания); $K_g=0.15$ (коэффициент забывания для ЭФП фонемного уровня в формуле операции забывания); $K_{Reset}=4.0$ (коэффициент сброса состояний ЭФП в момент принятия фонемного решения); $K_{Act}=1.0$ (коэффициент влияния признакового уровня FCAS на принятие фонемного решения в формуле); $K_{pd}=0.9$ (коэффициент влияния условных вероятностей признаков Вайрена-Штубса на величину активации признакового ЭФП); $K_{rg}=0.9$ (аналогичный коэффициент для ЭФП фонемного уровня); $\delta W=0.8$ (минимальный вес, который должен иметь сегмент, чтобы ядро модели FCAS добавило в выходную текстовую последовательность символ, распознанный в сегменте); $\delta TV=0.6$ (порог скачка состояний, на основе которого в модели ядра FCAS принимается решение о внеочередном добавлении нового символа в выходную текстовую последовательность).

Автором статьи также были проведены эксперименты с целью исследования влияния отдельных свободных параметров FCAS на точность распознавания (при фиксированных остальных параметрах). Эксперименты показали почти линейную зависимость ошибок распознавания WER от коэффициентов K_{pd} и K_{rg} : уменьшение этих коэффициентов (т.е. учет в меньшей степени фонетической статистики словаря) влечет за собой ухудшение качества распознавания, вследствие увеличения числа ситуаций с неоднозначным выбором звучащего образа фонемы. На рис.5 приведена диаграмма зависимости ошибок распознавания WER от коэффициента K_{Act} . Как видно из диаграммы, в реальной системе (с наличием многих дикторов, использованием недостаточно качественного оборудования, присутствием шума) установка коэффициента K_{Act} меньше 0.8 приводит к плохим результатам распознавания. Т.к. он регулирует влияние признакового уровня FCAS на принятие фонемного решения (одно из основных свойств модели FCAS).

Тестирование программного комплекса производилось на компьютере со следующими характеристиками: процессор Intel Core2Duo с тактовой частотой 2,67 ГГц; объем оперативной памяти 4 Гб. Как показали эксперименты, скорость

распознавания равна, в среднем, 9х (9 секунд сигнала обрабатываются за 1 секунду), что дает возможность использовать систему в реальном времени. При этом стоит отметить, что остается поле действий для дополнительной оптимизации. Временная нагрузка распределена следующим образом (время работы функций фиксировалось в виде количества тиков процессора с помощью функции Win32 API QueryPerformanceCounter()):

- 86% времени занимает цифровая обработка и сегментация, включая расчет амплитудно-временных характеристик сигнала, оконный спектральный и кепстральный анализ;

- 10% занимает нечеткая классификация, включая расчет частоты основного тона;

- 4% занимают функции FCAS и остальные действия.

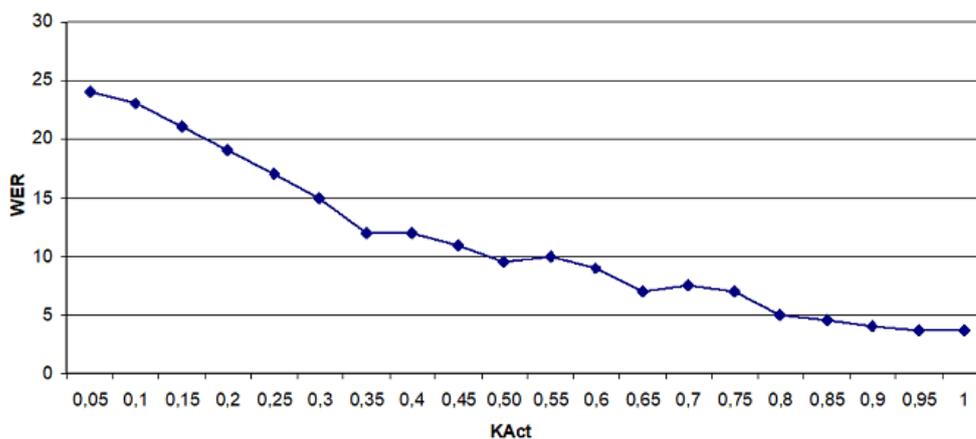


Рис.5. Влияние параметра KAct модели FCAS на процент ошибок распознавания

Выводы. В статье описана информационная технология распознавания речевых команд и поиска слов в речевых файлах, которая базируется на моделях и методах, предложенных в [5-9] и реализованных в программном комплексе CogniSPEECH. Создание систем распознавания голосовых команд с помощью комплекса включает следующие этапы: инициализация сети нечеткой когнитивной модели FCAS, редактирование словаря предметной области, программирование элементарных фонетических процессоров на лексическом уровне, настройка параметров модели. Модули VisualSpeech и Phonemes позволяют также пополнять статистическую базу фонемных образов, используемую системой. Комплекс CogniSPEECH включает исследовательский и вспомогательный фонетический модули, библиотеку функций цифровой обработки речевых сигналов, а также пользовательскую программу для распознавания и поиска слов. Скорость распознавания 9х позволяет использовать систему в реальном времени.

Экспериментально исследована точность распознавания слов тестовой системой, построенной в среде CogniSPEECH. На примере словаря робота получено для четырех дикторов повышение точности распознавания отдельных слов до 95-97%, а также повышение устойчивости системы к изменениям темпа произношения слов

Дальнейшая работа связана с добавлением в систему современных эффективных статистических моделей машинного обучения, таких как: машины опорных векторов, классификаторы на основе случайного леса, сверточные нейронные сети и нейронные сети с глубоким обучением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang X. Spoken Language Processing: A guide to theory, algorithm, and system development / X.Huang, A.Acerio, H.Hon. – Prentice Hall, 2001. – 980 p.
2. Zhang Y. Very deep convolutional networks for end-to-end speech recognition / Y. Zhang, W. Chan, N. Jaitly // Proceedings of ICASSP 2017. – 2017. – P. 4845-4850.
3. Dahl G. Context-Dependent Pre-trained Deep Neural Networks for Large-Vocabulary Speech Recognition / G.E. Dahl, D. Yu, L. Deng, A. Acero // IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. – Vol.20 (1) – 2012. – P. 30-42.
4. Best Audio Editing Software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://beebom.com/best-audio-editing-software>. – Загл. с экрана.
5. Шарий Т.В. Голосовое управление мобильным роботом на основе когнитивной модели FCAS / Т.В. Шарий // Искусственный интеллект. – 2014. – №2(64). – С.75-84.
6. Шарий Т.В. Модель постобработки речевых сигналов FCAS / Т.В. Шарий // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки». – 2012. – №4 (61). – С.157-165.
7. Шарий Т.В. Об одном методе автоматической сегментации речевых сигналов / Т.В. Шарий // Бионика интеллекта. – 2009. – №2(71). – С.61-65.
8. Каргин А.А. Применение нечеткой логики в системах фонологической классификации звуков речи / Каргин А.А., Шарий Т.В. // Искусственный интеллект. – 2010. – №3. – С.210-219.
9. Шарий Т.В. Анализ просодии на этапе параметризации речевого сигнала / Т.В. Шарий // Современные тенденции развития и перспективы внедрения инновационных технологий в машиностроении, образовании и экономике: материалы III Международной научно-практической конференции (Азов, 25 мая 2016 г.). – 2016. – С.142-147.
10. LAME (LAME Ain't an MP3 Encoder) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sourceforge.net/projects/lame>. – Загл. с экрана.

Поступила в редакцию 17.01.2018 г.

THE COGNISPEECH INSTRUMENTAL ENVIRONMENT FOR SPEECH SIGNAL DIGITAL PROCESSING AND RESEARCH

T.V. Sharii

The article presents the novel CogniSPEECH instrumental environment that allows performing and investigating various speech signal parameterization techniques. The software provides graphical and textual interactive means for speech information visualization. The methodology is offered for working with the environment, organizing vocabularies, adjusting free parameters of a fuzzy cognitive model of speech processing and investigating their impact on recognition accuracy. The results are given of experiments on the recognition of voice commands for mobile robot control based on created system.

Keywords: speech signal; FCAS; MFCC; phonological feature; phoneme; segmentation.

Шарий Тимофей Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, tsphere@mail.ru.

Timofei Viacheslavovich Sharii, PhD. in technical science, associate professor, tsphere@mail.ru.

Телефон для контактов: (+38) 050-769-61-79.

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.57+621.577

ТЕПЛОВЫЕ НАСОСЫ, РАБОТАЮЩИЕ ПО ЦИКЛУ СТИРЛИНГА, С ЦИЛИНДРАМИ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

© 2018 С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков

Рассмотрены варианты схем построения тепловых машин Стирлинга для теплонасосных установок. Предложены схемы машин двойного действия с цилиндрами, в рабочих полостях которых температуры рабочего тела одинаковы. Такое конструктивное решение позволяет повысить КПД машины благодаря снижению внутренних теплотерь. Исследованы параметры тепловых насосов подобных схем с тепловой мощностью от 5 до 200 кВт. Показано, что их эффективный КПД лежит в пределах 0,52...0,62. Рассмотрены принципы и возможности унификации конструкций теплонасосных установок с тепловыми машинами Стирлинга и цилиндрами постоянных температур,

Ключевые слова: теплонасосная установка, двигатель стирлинга, машина двойного действия, цилиндры постоянной температуры, звездообразные схемы, эффективный коэффициент полезного действия

Введение. Для получения теплоты сравнительно низкого потенциала в системах теплоснабжения, являющихся одними из наиболее крупных потребителей энергии, обычно используется высококачественное органическое топливо. Во многих случаях подача и распределение теплоты потребителям с помощью протяженных тепловых сетей экономически не оправдано. Для индивидуальных домов и отдельно расположенных объектов более предпочтительны децентрализованные системы. При этом по-прежнему основной проблемой развития современных систем теплоснабжения остается снижение расхода топлива за счет более рационального преобразования энергии.

Использование теплонасосных установок (ТНУ) является эффективным энергосберегающим мероприятием, позволяющим не только снизить энергопотребление систем отопления и горячего водоснабжения, но и использовать одновременно низкопотенциальные источники теплоты. Основное преимущество ТНУ состоит в том, что тепловые насосы являются средством, позволяющим получать значение коэффициента преобразования первичной энергии выше единицы. Результаты анализа эффективности таких устройств показывают, что наиболее предпочтительны тепловые насосы, работающие по циклу Стирлинга [1]. Их теоретический термодинамический цикл приближается к циклу Карно, что на практике, хотя и со значительными технологическими сложностями, позволяет создавать высокоэкономичные и экологически чистые миниэлектростанции, системы хладо- и теплоснабжения. За рубежом введены в строй опытные холодильные установки с машинами Стирлинга, с холодопроизводительностью до 100 кВт. Их эффективность оценивается в 1.5 раза выше, чем у лучших парокомпрессионных машин.

Анализ последних исследований и публикаций. Оценки показывают, что с учетом необходимости теплоснабжения различных по тепловым нагрузкам объектов, ТНУ должны иметь тепловую мощность от 5 кВт и выше. Возрастающие требования комфортности потребуют широкого внедрения локальных систем с комплексными теплонасосными установками, позволяющими обеспечивать как теплоснабжение (отопление и горячее водоснабжение), так и кондиционирование воздуха. Высокая

энергетическая эффективность таких систем обеспечивается путем создания термотрансформаторов на базе тепловых машин Стирлинга. Их обычно именуют «двигателями Стирлинга» в связи с тем, что первоначально конструкторы основное внимание уделяли созданию именно двигателей, позволяющих преобразовывать теплоту в механическую энергию. В последнее время терминология уточнилась, поэтому такие машины, работающие по обратным термодинамическим циклам, именуют охладителями, холодильниками Стирлинга, хотя многие авторы [2,3] по-прежнему называют их двигателями. В то же время машины Стирлинга являются одним из устройств, в наибольшей мере обладающих свойством обратимости. Двигатель сравнительно легко превратить в термотрансформатор, причем для этой операции обычно нет необходимости вносить существенные изменения в его конструкцию. Представляется более точным называть их не двигателями, а «универсальными тепловыми машинами Стирлинга» (УТМС) [4], имея в виду возможности многофункционального использования.

Несомненным достоинством УТМС является возможность использования практически любых источников низкопотенциальной теплоты: продуктов сгорания органических топлив, ядерной, солнечной, геотермальной энергии, тепловых ВЭР. Для эффективной работы машин Стирлинга при температуре внешней среды около 300 К необходим источник теплоты с температурой не ниже 500 К, причем КПД двигателей с ростом температуры этого источника неуклонно увеличивается. Однако даже в современных конструкциях сложно обеспечить рабочую температуру деталей и узлов выше 1200 К при высоких давлениях, характерных для них, что серьезно ограничивает возможности этих двигателей. Для термотрансформаторов систем теплоснабжения характерны значительно меньшие температуры источников теплоты, лежащие в интервале 250...400 К. Это в значительной мере облегчает условия работы теплообменников, деталей цилиндрической группы, элементов узлов уплотнений рабочих полостей. Сравнительно невысокие рабочие температуры позволяют принимать для тепловых насосов и охладителей такие схемы машин, которые практически неприемлемы для двигателей.

Цель работы: на основе известных теоретических положений и выполненных исследований в рассматриваемом направлении рекомендовать рациональную конфигурацию УТМС для ее применения в качестве ТНУ систем теплоснабжения.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих **задач**:

1. Выполнить предметный анализ опыта применения ТНУ на базе машин Стирлинга в системах теплоснабжения.
2. Выделить основные достоинства различных конфигураций УТМС двойного действия с цилиндрами постоянной температуры на примере звездообразных машин.
3. Рекомендовать для применения в сетях децентрализованного теплоснабжения рациональную конфигурацию УТМС, обеспечивающую наибольший КПД действительного цикла и обладающую рядом эксплуатационных и конструктивных достоинств.

Основная часть. Среди известных схем УТМС, которые применяются для создания термотрансформаторов систем теплоснабжения, наибольший интерес представляют машины двойного действия [2]. Их рабочие полости располагаются по обе стороны поршней, причем такие машины всегда выполняются многоцилиндровыми.

Исследования вариантов компоновки УТМС двойного действия для тепловых насосов показали, что с целью повышения их компактности и КПД цилиндры

целесообразно соединять через теплообменники и регенераторы друг с другом таким образом, чтобы в каждом из этих цилиндров располагались только горячие или только холодные полости. В этом случае часть цилиндров работает при высокой температуре рабочего тела (температуре нагревателя, отдающего тепло в систему теплоснабжения), а другая часть цилиндров – при низкой температуре того же рабочего тела (температуре охладителя, отбирающего тепло от источника теплоты). Тогда каждый цилиндр, его поршень, шток и др. детали работают при практически постоянных температурах, соответствующих температурам нагревателя или охладителя, т.е. являются цилиндрами постоянной температуры.

Схематическое устройство одной из схем УТМС с цилиндрами постоянной температуры представлено на рис. 1. В данном случае в качестве примера показано звездообразное однорядное расположение цилиндров. По аналогии со схемами ДВС возможны также однорядные, V-образные, Y-образные, X-образные и др. схемы расположения цилиндров. Варианты их построения разнообразны и вопросы эти требуют дополнительных исследований.

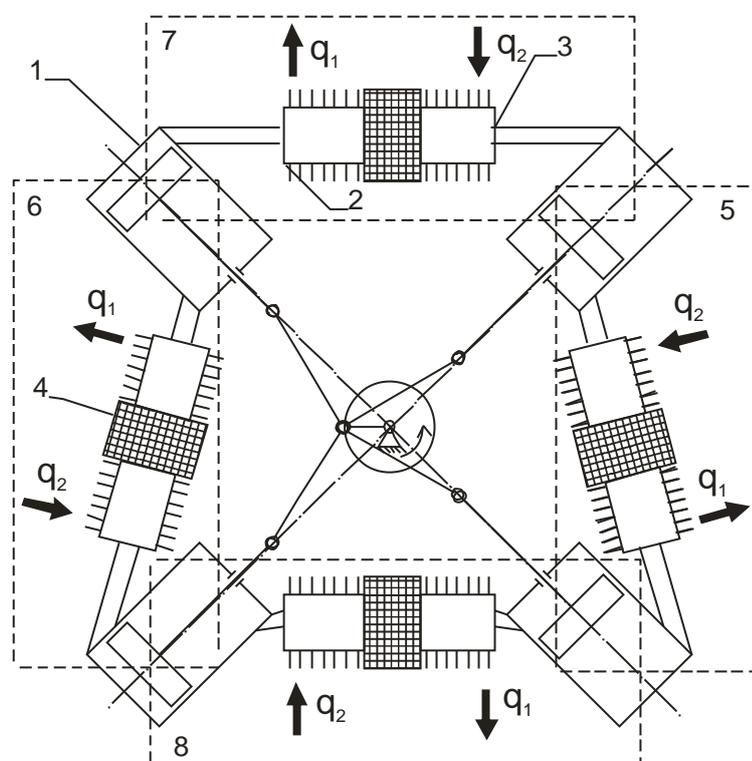


Рис. 1. Схема УТМС двойного действия с равными температурами в полостях каждого из цилиндров в варианте теплового насоса.

1 – цилиндры; 2 – нагреватели; 3 – охладители; 4 – регенераторы; 5-8 – «элементарные» машины (выделены пунктирными прямоугольниками)

Ввиду постоянства температуры цилиндров в качестве основных достоинств таких схем необходимо отметить следующие:

1. Отсутствие внутренних потерь теплоты теплопроводностью деталей цилиндра, поршня и штока.
2. Минимальные внутренние потери конвекцией и излучением при перемещениях рабочего тела.
3. Отсутствие «челночного» переноса теплоты поршнем.
4. Возможность снижения высоты (длины) поршня до минимальных размеров.

5. Снижение массы поршня ввиду отсутствия необходимости его внутренней теплоизоляции.

6. Принципиальная возможность применения лабиринтных уплотнений для пары «цилиндр-поршень» несмотря на увеличение длин цилиндра и поршня.

Перечисленные факторы позволяют существенно повысить КПД такой УТМС (в сравнении, например, с β -модификацией или γ -модификацией). Благодаря фактически полному разнесению в пространстве полостей расширения и сжатия. Вторым результатом, способствующим возрастанию эффективности, является возможность теплоизоляции отдельных цилиндров с целью снижения теплотерь в окружающую среду (при установке, например, машины в холодном помещении).

Приведенная на рис.1 и идентичные ей схемы неприменимы для собственно двигателей Стирлинга, т.к. температура стенок цилиндров не должна превышать $\sim 200^{\circ}\text{C}$ для обеспечения работы узлов уплотнений и смазки. В современных низкотемпературных системах отопления, горячего водоснабжения, и кондиционирования температуры теплоносителей лежат в сравнительно узком интервале от $+5$ до $+60^{\circ}\text{C}$. Соответственно диапазон рабочих температур для деталей, механизмов и узлов термотрансформаторов, предназначенных для этих систем, составляет $-20\dots+100^{\circ}\text{C}$.

Исследование параметров УТМС предлагаемых схем сводится к условному разбиению их на отдельные машины Стирлинга известных модификаций [2,3]. Так, например, УТМС, представленную на рис.1, следует рассматривать, по существу, как четыре отдельные машины двойного действия, которые отличаются отношениями вытесняемых объемов и законами их изменения. На схеме пунктирными прямоугольниками отмечены эти элементарные машины, причем контур 5 выделяет машину двойного действия схемы, а контур 6 – обращенную машину двойного действия. Контур 7 и 8 отмечают «симметричные» схемы УТМС с равными вытесняемыми объемами у каждой из них. У таких «симметричных» машин обе рабочие полости располагаются либо над поршнем, либо под ним, поэтому для них отношение вытесняемых объемов $k = 1$. Принципиально схема 7 ничем не отличается от машины α -модификации, а схема 8 является схемой «обращенной» машины α -модификации.

К таким УТМС, как и к машинам традиционных модификаций, предъявляются следующие основные требования при выборе их параметров:

1. Оптимальное значение угла фазового сдвига изменений рабочих объемов полостей сжатия и расширения.
2. Оптимальная величина соотношения вытесняемых объемов этих полостей.
3. Внутреннее и внешнее уравнивание механизма привода УТМС.

Расчеты и оптимизация параметров таких машин показывают, что обеспечить строгое выполнение вышеперечисленных условий не удастся. Важным является выбор критерия оптимизации. Обычно в качестве таких критериев выступают параметр удельной работы, либо эффективный КПД.

Так, например, результаты расчетов показывают, что оптимальные значения угла фазового сдвига α в УТМС двойного действия лежат в пределах $70\dots110^{\circ}$. Это обычно является основанием для определения числа цилиндров в них. Но расчеты параметров действительных циклов показывают, что если в качестве оптимизируемого параметра принята удельная работа, то угол фазового сдвига должен составлять около 90° , как это следует из рис. 1. В то же время максимум КПД действительного цикла достигается при значении угла фазового сдвига $115-125^{\circ}$, что существенно влияет на выбор как числа цилиндров, так и их расположения относительно коленчатого вала.

Полученные результаты дают основание также рекомендовать для теплового насоса схему «двухрядной звезды», приведенную на рис.2. Эту 6-цилиндровую машину следует

рассматривать как комплекс из «элементарных» шести машин α -модификации и шести машин «обращенной» α -модификации. Угол фазового сдвига $\alpha = 120^\circ$ обеспечивается взаимным расположением кривошипов на общем коленчатом валу. Размещение цилиндров в каждом ряду под углом 120° друг к другу обеспечивает уравнивание в каждом из рядов и, соответственно, уравнивание УТМС в целом.

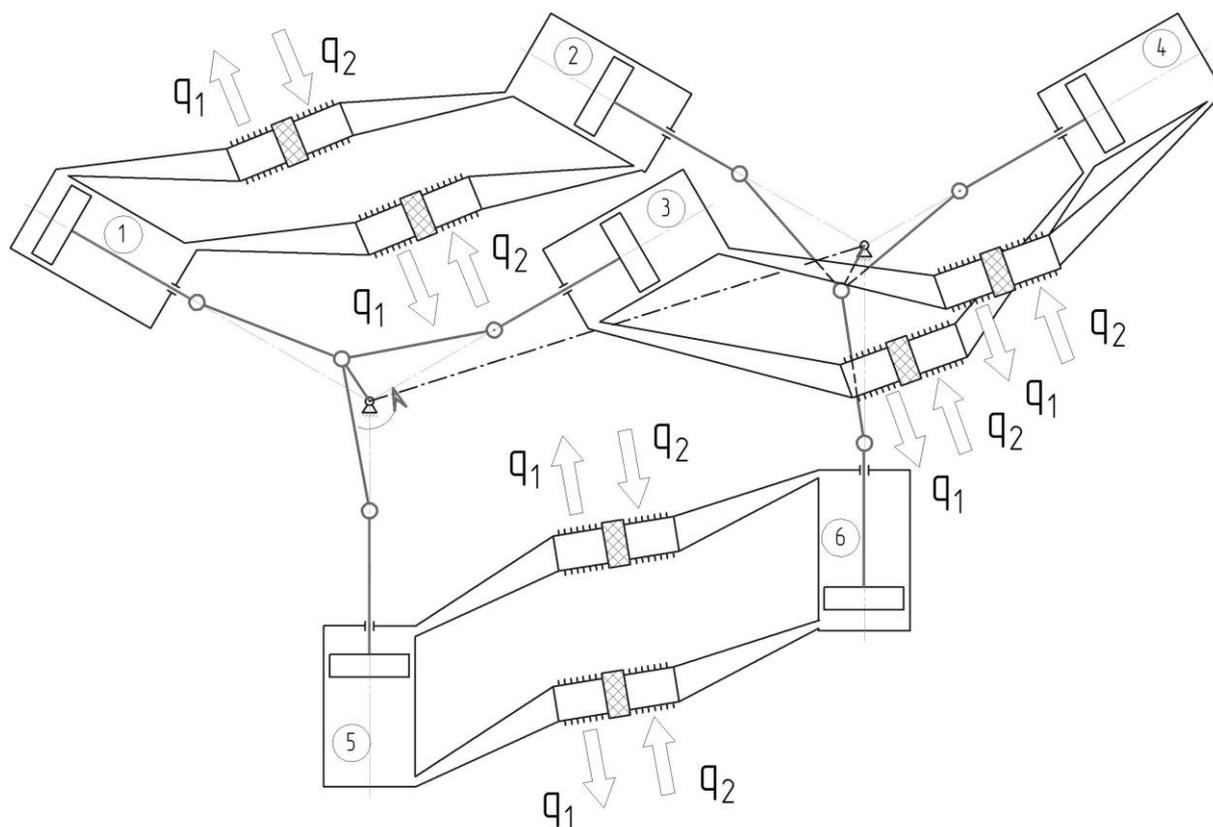


Рис. 2. Схема 6-цилиндровой УТМС двойного действия с постоянными температурами цилиндров 1,3,5 – цилиндры с температурой нагревателей; 2,4,6 – цилиндры с температурой охладителей.

Результаты исследований показывают, что при близких значениях абсолютных температур источников теплоты, характерных для термотрансформаторов систем теплоснабжения (отношение их составляет 0.7...0.9), величины работы для отдельных элементарных машин отличаются незначительно. Поэтому при их совместной работе не следует опасаться существенного возрастания неравномерности вращения вала, тем более что с увеличением числа цилиндров эта неравномерность уменьшается.

Для схемы, приведенной на рис.2, существенно упрощаются вопросы теплоизоляции не только отдельных цилиндров постоянной температуры, но и блоков (позиции 1,3,5 и 2,4,6) из таких цилиндров. Поскольку цилиндры обычно непосредственно соединяются с соответствующими теплообменниками – нагревателями или охладителями, то становится возможной тепловая изоляция «нагретой» и «охлажденной» частей УТМС. Это позволяет снизить потери теплоты конвекцией и излучением в окружающую среду, что также является одним из достоинств. Внутренние потери теплоты в машине будут определяться, в основном, передачей ее теплопроводностью по корпусам и насадкам регенераторов, а также трубкам теплообменников.

УТМС являются сложными устройствами, их стоимость в настоящее время сравнительно высока. Ее снижение представляется возможным при организации серийного производства, расширение которого всегда снижает себестоимость продукции. Поэтому необходима унификация конструкций ТНУ с УТМС, которая должна предусматривать возможность изготовления основных узлов и деталей на основе единых типоразмеров.

Поскольку тепловые мощности ТНУ могут лежать в широком интервале значений, был проведен анализ с разделением термотрансформаторов на группы по мощности и другим параметрам – типу привода, частотам вращения, конструктивной схеме и др. Это позволило в определенной мере предложить варианты унификации УТМС. В ходе исследований для диапазона тепловой мощности 1...1000 кВт рассмотрены зависимости КПД для машин с различными частотами вращения и числом цилиндров.

Для составления сводной диаграммы (рис.3), позволяющей оценить значения КПД ТНУ в указанном интервале тепловых мощностей и частот вращения, были приняты следующие исходные данные: – рабочее тело внутреннего контура – водород, теплоноситель во внешних контурах – вода при температуре источника низкопотенциальной теплоты $+4^{\circ}\text{C}$, температуре в системе отопления $+50^{\circ}\text{C}/+40^{\circ}\text{C}$.

Частота вращения вала УТМС при вычислениях принималась 1500, 1000, 750 и 500 мин^{-1} в соответствии с наиболее распространенными частотами вращения синхронных двигателей переменного тока.

Результаты показывают, что при частоте вращения в пределах 500-1500 мин^{-1} значения КПД превышают 0.5 во всем интервале мощностей, причем с уменьшением скорости вращения они возрастают. Оптимизация параметров ТНУ с различным числом цилиндров показала, что при принятых исходных параметрах наиболее эффективны 12- и 24-цилиндровые машины. Увеличением числа цилиндров свыше 12 дает небольшой прирост КПД при значительном усложнении конструкции.

С целью получения обобщающих зависимостей для термотрансформаторов с различной тепловой мощностью при проведении дальнейших исследований средняя скорость поршня была ограничена значением 3 м/с, а диапазон возможных диаметров цилиндра ограничен интервалом от 40 до 100 мм. В результате получен ряд диаграмм, позволяющих выбирать геометрические параметры УТМС. Одна из них представлена на рис.3.

Как следует из рисунка, при числе цилиндров 6 и выше и частотах вращения не более 1000 мин^{-1} эффективный КПД УТМС теплонасосной установки с электроприводом в диапазоне тепловой мощности 5...200 кВт превышает 0,5 и составляет преимущественно 0,52-0,62. Исследования также показали необходимость введения дополнительных ограничений для параметров нагревателей и охладителей.

Представленная диаграмма наглядно демонстрирует перспективы и возможности построения ТНУ с УТМС двойного действия.

Вывод. В работе выполнен анализ международного опыта применения в системах децентрализованного теплоснабжения ТНУ, созданных на базе универсальных тепловых машин Стирлинга. На основании исследования известных схем УТМС двойного действия с цилиндрами постоянной температуры, сформулированы основные достоинства этих машин с учетом различных конфигураций тепловых контуров, а также предъявляемые требования при выборе конструкционных и режимных параметров. Полученные в работе результаты позволили рекомендовать для ТНУ систем теплоснабжения 6-ти цилиндровую УТМС, выполненную по схеме «двухрядная звезда» с углом фазового сдвига 120° и представляющую комплекс «элементарных» шести машин α -модификации и шести машин «обращенной» α -модификации.

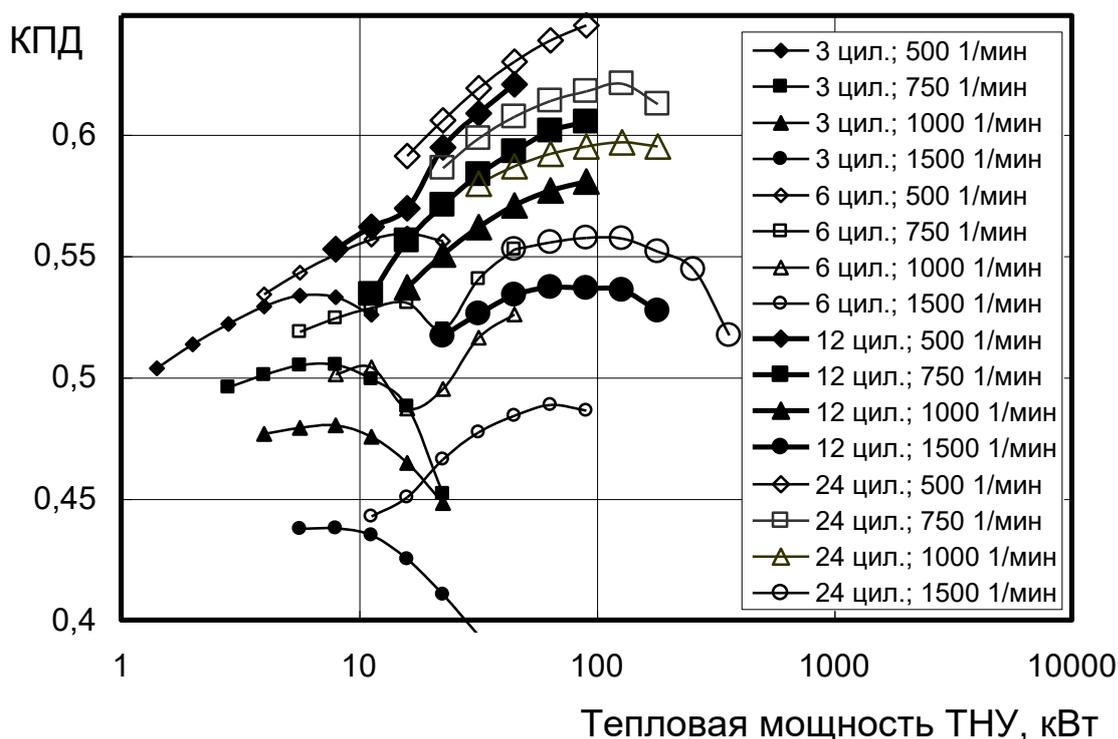


Рис. 3. Диаграмма ориентировочного выбора параметров УТМС для ТНУ

1. Предложенная конфигурация позволяет достичь максимума КПД действительного цикла, сократить потери теплоты конвекцией и излучением, а также обеспечить уравновешенность УТМС в целом при относительно невысокой неравномерности вращения ее коленчатого вала.

2. Диапазон тепловых мощностей с эффективным КПД более 0,5 составляет от 5 до 400 кВт. Такие тепловые нагрузки характерны для современных индивидуальных домов, небольших многоквартирных и общественных зданий. При снятии вышеуказанных ограничений могут быть получены значения КПД до 0,65 (см. рис.1).

3. В процессе проектирования ТНУ оптимизацию их параметров и составление аналогичных диаграмм следует выполнять с учетом рабочих температур, принятых свойств материалов, рабочих тел, параметров деталей, конструктивных особенностей.

4. Следует рекомендовать в процессе проектирования ТНУ модульный принцип построения УТМС, предполагающий создание машин различной тепловой мощности на базе унифицированных деталей и узлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горожанкин С.А. Возможности и перспективы машин Стирлинга в системах теплоснабжения и утилизации тепловых ВЭР / С.А.Горожанкин // Тр. Международного научно-практического семинара «Гидродинамика и экология». Донецк, 2009. – С.35-38.
2. Уокер Г. Двигатели Стирлинга: Пер с англ. / Г.Уокер. – М.: Машиностроение, 1985. – 408с.
3. Organ, Allan J. The air engine. Stirling cycle power for a sustainable future. – Woodhead publishing limited and CRC Press. . Cambridge England, 2007. -.278p.
4. Горожанкин С.А. Машины Стирлинга: параметры рабочих процессов / С.А.Горожанкин. – Макеевка: ДонГАСА, 2003. – 208 с.

5. Горожанкин С.А. Сравнительный анализ моделей идеальных циклов универсальных тепловых машин Стирлинга / С.А., Горожанкин А.В., Чухаркин // Вісник Донецької академії автомобільного транспорту, №3. – 2011. – С.65-70.

Поступила в редакцию 30.01.2018 г.

HEAT PUMPS OPERATING ON THE STIRLING CYCLE WITH CONSTANT TEMPERATURE CYLINDERS

Sergey A. Gorozhankin, Nikita V. Savenkov

The variants of constructing schemes of Stirling heat machines for heat pump plants are considered. The schemes of double-acting machines having cylinders with working cavities with the same temperatures of the working body are proposed. This design allows increasing the efficiency of the machine due to the reduction of internal losses. The parameters of the heat pumps of similar schemes with the thermal power of 5 to 200 kW are investigated. It is shown that their effective efficiency factor ranges between 0,52...0,62. The principles and possibilities for unifying the designs of heat pump plants with Stirling heat machines and cylinders of constant temperatures are considered.

Keywords: heat pump plant, stirling engine, double acting machine, cylinders of constant temperature, star scheme, effective efficiency factor

Горожанкин Сергей Андреевич, доктор технических наук, профессор, ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», кафедра «Техническая эксплуатация и сервис автомобилей, технологических машин и оборудования».

E-mail: gormar52@gmail.com

286123, Донецкая область, г. Макеевка, ул.

Державина, д. 2.

Тел.: 050-473-80-78.

Gorozhankin Sergey A., Dr.Sc., professor. Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture.

Савенков Никита Владимирович, ассистент, ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», кафедра «Техническая эксплуатация и сервис автомобилей, технологических машин и оборудования».

E-mail: SavenkovNV@yandex.ru

Тел.: 099-070-00-85.

Savenkov Nikita V., assistant, Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture.

УДК 669-1+519-6

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ДЕСУЛЬФУРАЦИИ В АГРЕГАТЕ КОВШ-ПЕЧЬ

© 2018 В.В. Белоусов, В.В. Бодряга, В.И. Бондаренко, Ф.В. Недопекин, Я.В. Павлов

Рассматриваются физическая и математические модели процессов в агрегате ковш-печь. Показано влияние различных методов продувки на процесс удаления неметаллических включений. Сравнивая результаты вычислительного и промышленного экспериментов можно сделать вывод о возможности применения ИП для снижения энерго-, ресурсо- затрат и повышения качества выплавляемой стали.

Ключевые слова: агрегат ковш-печь; импульсная продувка; десульфурация; число Ричардсона.

Введение. Для обработки стали в агрегатах ковш-печь (АКП) используется продувка инертными газами (аргоном), которая необходима для:

- гомогенизации расплава по химическому составу;
- равномерного прогревания объема жидкой стали;
- удаления неметаллических включений.

Расход газа должен обеспечить качественную гомогенизацию по температуре и химическому составу, но при этом не должен привести к попаданию неметаллических включений из шлака в объем жидкого металла [1]. Ко всему этому стоит добавить постоянную актуальность энерго- и ресурсо- сбережения.

Физическая постановка задачи. Поэтому для интенсивного перемешивания расплава необходимо турбулизовать поток [2]. Одним из способов достижения турбулентности является переменный расход газа через две и более продувочные пробки, причем, расход через каждую пробку может быть неодинаков [3]. Для данной технологии принято название: “Импульсная продувка” (ИП). При стандартной технологии продувки, расход аргона постоянен и сохраняется на протяжении некоторого технологического периода плавки. При ИП расход аргона постоянно меняется от нуля до заданной величины. Изменение расхода газа на протяжении плавки осуществляется в несколько этапов. На первом этапе, происходят интенсивные десульфурация, прогрев стали, процесс гомогенизации после отдачи основного количества легирующих элементов (в этот период расход аргона максимальный). На втором этапе, температура расплава приближается к необходимой для разлива в МНЛЗ и расход газа снижается. На третьем этапе, когда достигнут не только необходимый температурный режим расплава, но и его химический состав расход аргона снижается до минимума. Это необходимо для предотвращения отбора неметаллических включений (НВ) из шлака в объем жидкой стали и перевода в шлак НВ, которые образовались вследствие окисления легирующих элементов в более ранние – агрессивные периоды плавки. Последнее связано с тем, что в период интенсивного барботажа (первый этап) НВ были вовлечены из шлака в расплав.

Для оценки эффективности использования данной технологии, на заводе ООО “Электросталь” была проанализированы 16 плавов с использованием вышеописанной технологии. Показатели этих плавов сравнивались с плавками обработанными на АКП без использования технологии ИП, в этот же период времени. Для анализа эффективности ИП в промышленном эксперименте рассматривался такой важный параметр плавки, как десульфурация.

Был обработан массив значений содержания серы в плавках, один из которых представлен на рис. 1. Результаты сглаживания, свидетельствуют о квадратичном характере поведения функции/

Зависимость скорости десульфурации от времени обработки определяется как производная от функции представленной на рис. 1, результаты приведены на рис. 2.

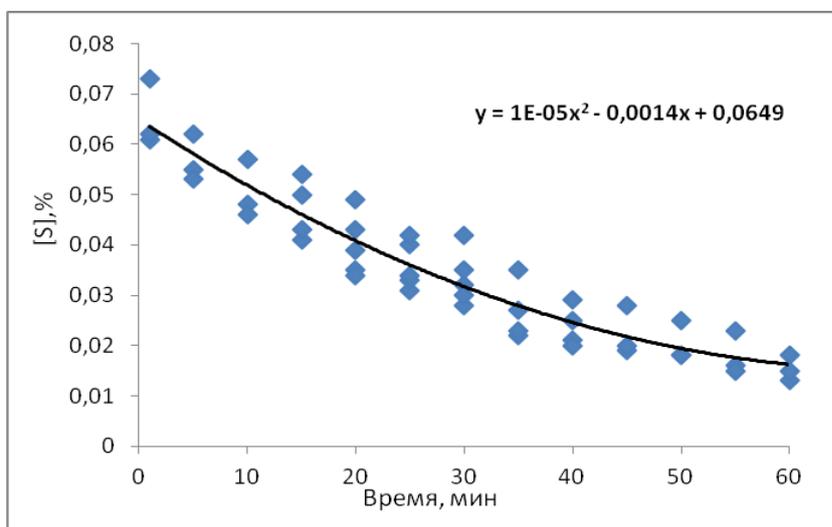


Рис. 1. Анализ процесса десульфурации в плавках без импульсной продувки

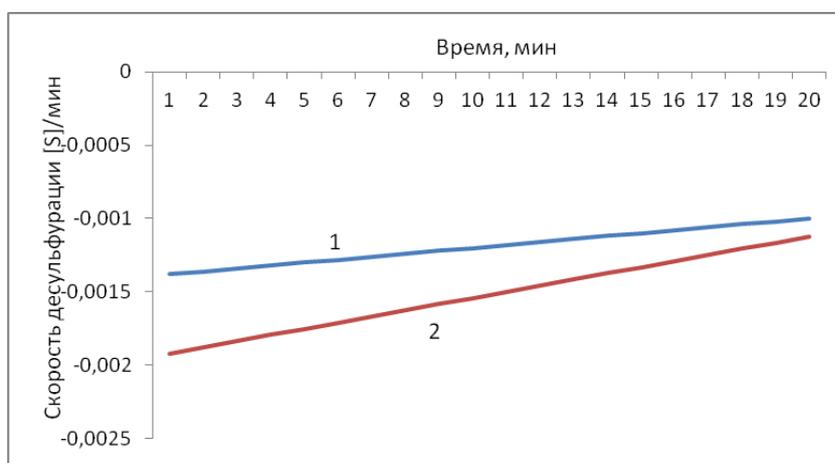


Рис. 2. Зависимость изменения скорости десульфурации во времени. Прямая 1-плавки без импульсной продувки, прямая 2-плавки с ИП

Из рисунка 2 видно, что средняя скорость десульфурации в начале обработки на АКП (первые 20 мин) с использованием ИП составляет от $-0,0019$ до $-0,0011$ $[S]/\text{мин}$. В плавках без импульсной продувки – от $-0,0014$ до $-0,001$ $[S]/\text{мин}$. Т.е. удаление серы в плавках с ИП проходило на 20% эффективнее. Отрицательные значения скорости десульфурации свидетельствует о тенденции снижения количества серы в расплаве.

Математическая постановка задачи. Для более глубокого исследования и понимания процессов в АКП, на базе среды разработки Visual Studio, была разработана

математическая модель, пространственные процессы в которой описываются уравнением Навье-Стокса в переменных вихрь – скорость ($\omega - V$):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \omega_x}{\partial t} + \frac{\partial u \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial v \omega_x}{\partial y} + \frac{\partial w \omega_x}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial x} \omega_x - \frac{\partial u}{\partial y} \omega_y - \frac{\partial u}{\partial z} \omega_z = \\ & = \nu \left[\frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial z^2} \right] - |\bar{g}| \beta \frac{\partial \Gamma}{\partial y} - |\bar{g}| \frac{\partial \beta_{\Gamma}}{\partial y}; \\ & \frac{\partial \omega_y}{\partial t} + \frac{\partial u \omega_y}{\partial x} + \frac{\partial v \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial w \omega_y}{\partial z} - \frac{\partial v}{\partial x} \omega_x - \frac{\partial v}{\partial y} \omega_y - \frac{\partial v}{\partial z} \omega_z = \\ & \nu \left[\frac{\partial^2 \omega_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_y}{\partial z^2} \right] + |\bar{g}| \beta \frac{\partial \Gamma}{\partial x} + |\bar{g}| \frac{\partial \beta_{\Gamma}}{\partial x}; \\ & \frac{\partial \omega_z}{\partial t} + \frac{\partial u \omega_z}{\partial x} + \frac{\partial v \omega_z}{\partial y} + \frac{\partial w \omega_z}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \omega_x - \frac{\partial w}{\partial y} \omega_y - \frac{\partial w}{\partial z} \omega_z = \\ & = \nu \left[\frac{\partial^2 \omega_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_z}{\partial z^2} \right]; \end{aligned}$$

Уравнения неразрывности и теплопереноса, а также начальные и граничные динамические и тепловые условия представлены в работе [5].

Для описания процесса барботажа используется модель, описанная в работе [4]. уравнение переноса газовой фазы:

$$\frac{\partial \beta_{\Gamma}}{\partial t} + (\bar{V} \nabla) \beta_{\Gamma} = f_V + f_D$$

Взаимодействие жидкой и газовой фаз описывается источниковым членом вида:

$$f_V = \frac{Q \cdot T}{V \cdot 273},$$

где Q – объемный расход газа; V – объем зоны в которую поступает газ; T – температура.

Диффузионный член:

$$f_D = D \Delta \beta_{\Gamma},$$

где D – коэффициент турбулентной диффузии.

Начальные условия:

$$\beta_{\Gamma} \Big|_{t=0} = 0;$$

Граничные условия на границе футеровка-расплав, шлак-расплав:

$$\beta_{\Gamma} = 0;$$

Несимметричность расположения пробок не позволило решать задачу в цилиндрических координатах. Поэтому, для генерации сетки выбраны декартовы координаты, где в торцевых частях области подбором шагов аппроксимировалось основание цилиндра [5]:

Результаты численного эксперимента. Проведены численные эксперименты, в которых рассматривались следующие варианты продувки:

- с одной продувочной пробкой;

- с двумя продувочными пробками;
- с двумя продувочными пробками в импульсном режиме.

Для анализа эффективности вышеописанных технологий, на протяжении эксперимента проводился контроль изменения числа Ричардсона, отношения плотности кинетической и тепловой энергий.

$$Ri = \frac{\Delta\rho \bar{g}L}{\rho_{ж} v^2},$$

где $\rho_{ж}$ – плотность расплава; $\Delta\rho$ – разность плотностей расплава и газа; g – ускорение свободного падения; L – характерная длина в вертикальном направлении; v – характерная скорость.

При рассмотрении температурной конвекции изменение плотности вызвано нагреванием:

$$\Delta\rho = \rho\beta\Delta T.$$

В этом случае число Ричардсона можно записать как:

$$Ri = \frac{\bar{g}\beta\Delta TL}{v^2} = \frac{Gr}{Re^2},$$

где β – коэффициент теплового расширения; ΔT – характерная разница температур, например между стенкой и расплавом; v – характерная скорость; Gr – число Грасгофа; Re – число Рейнольдса.

Если число Ричардсона меньше единицы, то Gr не играет существенной роли для течения. Если Ri больше единицы, то сила плавучести доминирует (в том смысле, что конвекция не может эффективно перемешать расслоившуюся по плотности среду).

Результаты представлены на следующих рисунках:

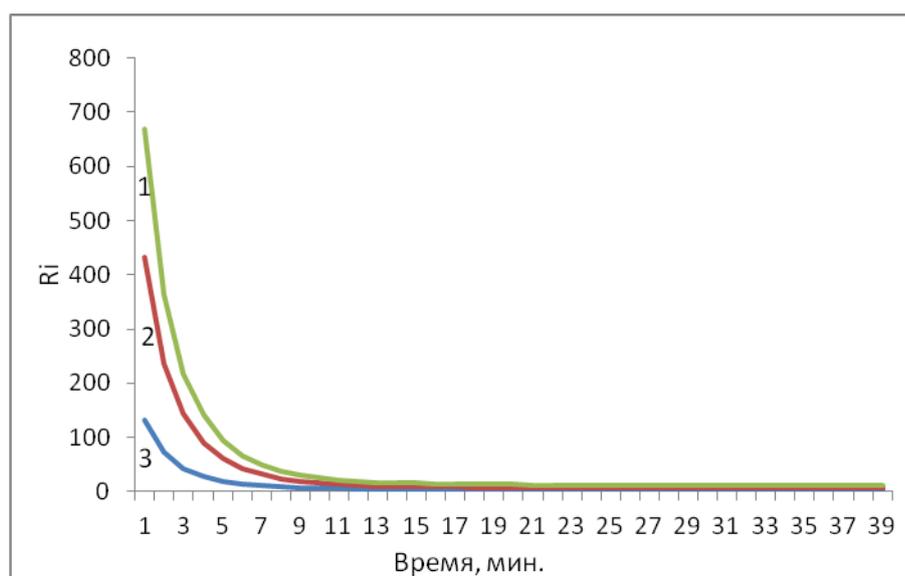


Рис. 3. Изменение числа Ричардсона на протяжении плавки с разными технологиями продувки. Кривая 1 – две пробки, кривая 2 – ИП, кривая 3 – одна пробка

Из рис. 3 видно, что первые 11 мин. преобладают силы плавучести, вызванные разностью плотностей расплава. На втором этапе, вследствие вовлечения все больших объемов металла в конвекцию – значение сил плавучести и конвекции становятся соизмеримы. В данном случае – основное изменение Ричардсона в данных экспериментах обусловлено разными скоростями потоков, ведь как видно ранее – в расчетную формулу для числа Ri входит число Re , в котором присутствует скорость течения. Число Ri максимально при продувке одной пробкой вследствие достижения максимальных скоростей в сравнении с продувкой двумя пробками, где возникают встречные потоки, препятствующие возрастанию скорости течения. По рис. 4а видно, что данная тенденция прослеживается и при анализе плотности кинетической энергии движения расплава. В случае одной пробки она выше за счет больших скоростей. Но в случае импульсной продувки видно значительное увеличение (на 27,3%) в сравнении с продувкой двумя пробками при постоянном расходе и с продувкой одной пробкой (на 45,5%) при постоянном расходе. И это не смотря на меньшую (в сравнении с продувкой одной пробкой) скорость течения жидкой стали в ковше. Это следствие увеличения турбулизации течения, уменьшения количества застойных зон, а следовательно и более качественного перемешивания расплава.

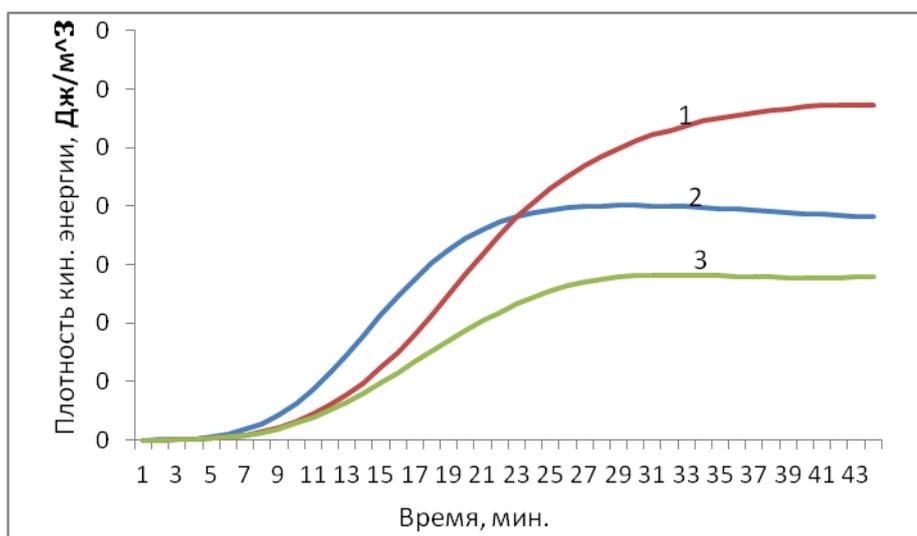


Рис. 4а. Изменение плотности кинетической энергии на протяжении плавок с разными технологиями продувки. Кривая 1 – ИП, кривая 2 – одна пробка, кривая 3 – две пробки

Другим важным параметром при анализе тепловой и гидродинамической обстановки в расплаве является распределение плотности тепловой энергии (E_T по объему, которая определяется как:

$$E_T = \frac{1}{V} \iiint_V T(x, y, z) dx dy dz.$$

Плотность тепловой энергии E_T (Рис 4б) так же максимальна в эксперименте с импульсной продувкой (кривая 1). Уже на 38й минуте значение E_T кривой 1 превышает E_T в эксперименте с двумя продувочными пробками и с постоянным расходом на 3,4% (кривая 2), а в эксперименте с одной продувочной пробкой (кривая 3) – на 7,5%. Это означает, что тепловая конвекция интенсивнее в эксперименте с ИП и приводит к уменьшению времени нагрева расплава до необходимой температуры.

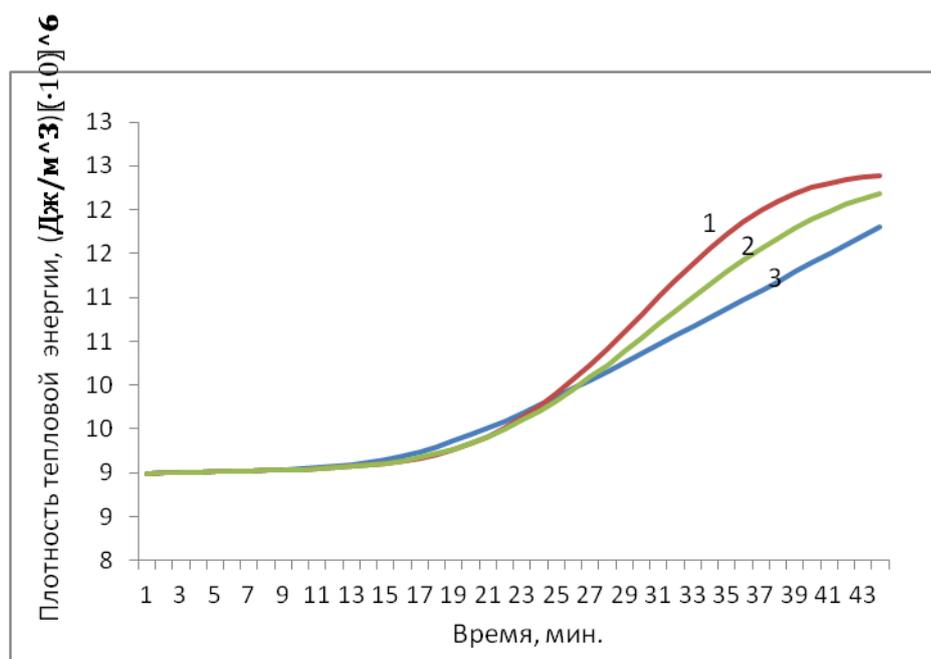


Рис46. Изменение плотности тепловой энергии на протяжении плавки с разными технологиями продувки. Кривая 1 – ИП, кривая 2 – две пробки, кривая 3 – одна пробка

Выводы.

Разработана математическая модель и вычислительный алгоритм, описывающие гидродинамические и теплофизические процессы в агрегате ковш-печь.

Сравнивая результаты вычислительного и промышленного экспериментов можно сделать вывод о возможности применения ИП для снижения энерго-, ресурсо- затрат и повышения качества выплавляемой стали. Видно, что технология, примененная на ООО “Электросталь” позволила на практике увеличить на 20% скорость десульфурации. Эти результаты подтверждаются компьютерным экспериментом – он показал, что происходит увеличение числа Re , увеличивается плотность кинетической энергии (на 27,3%) при снижении скорости течения, что свидетельствует о увеличении турбулизации течения, уменьшении количества застойных зон, а следовательно и более качественного перемешивания расплава, что в свою очередь приводит к увеличению плотности тепловой энергии (на 3,4%) и как следствие – ускоряет процесс прогрева расплава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дюдкин Д.А. Производство стали. Том 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки / Д.А.Дюдкин, В.В.Кисиленко. – М.: «Теплотехник», 2008. – С 150–173.
2. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. 2-е изд. / И.Л.Повх. – Л.: Машиностроение, 1976. – С. 14–15.
3. Шумахер Э.Э. Технология APS продувки металла в сталеразливочном ковше / Э.Э.Шумахер, В.В.Смокий, В.Г.Порохнявый и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – №7. – 2010. – С.211-212.
4. Куликов Е.Н. Численное моделирование процессов перемешивания при продувке ванны агрегата ковш-печь / Е.Н.Куликов, В.Ф.Комаров, В.В.Белоусов // Математическое моделирование. – №2(17). – 2007. – С. 61-63.
5. Павлов Я.В. Моделирование теплофизических процессов в футеровке сталеразливочного ковша / Я.В.Павлов, В.В.Белоусов, В.В.Михеев // Математическое моделирование. – №2(27). – 2012. – С. 19-22.

Поступила в редакцию 16.02.2018 г.

INTENSIFICATION OF THE DESULFURATION PROCESS IN THE UNIT LADLE FURNACE

V. Bilousov, V. Bodryaga, V. Bondarenko, F. Nedopekin, Ya. Pavlov

The physical and mathematical models of processes in the ladle-furnace unit are considered. The influence of various blowing methods on the process of removal of nonmetallic inclusions is shown. Comparing the results of computational and industrial experiments, it can be concluded that the IP can be used to reduce energy, resource costs and improve the quality of the steel produced.

Keywords: Unit ladle furnace; impulse blowdown; desulfurization; Richardson number.

Белоусов Вячеслав Владимирович, проф., д-р техн. наук, зав. кафедрой физики неравновесных процессов, экологии и метрологии Донецкого национального университета
Адрес для переписки: 83001, Донецк, ул. Челюскинцев 148/59,
E-mail: v.v.bilousov@gmail.com

Bilousov Vyacheslav Vladimirovich, Prof., Head. Department of Physics nonequilibrium processes, metrology and ecology of Donetsk national university

Бодряга Виктор Викторович, старший преподаватель кафедры «Компьютерных технологий» Донецкого национального университета

Bodryaga Viktor Viktorovich, senior lecturer of the department Computer technologies of Donetsk National University

Бондаренко Виталий Иванович, старший преподаватель кафедры «Компьютерных технологий» Донецкого национального университета

Bondarenko Vitaliy Ivanovich, Senior Lecturer of Computer Technologies Department of Donetsk National University

Недопекин Федор Викторович, профессор кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии Донецкого национального университета

Nedopekin Fedor Voktorovich, Professor of the Department of Physics of nonequilibrium processes, metrology and ecology of Donetsk National University

Павлов Ярослав Владимирович, инженер-технолог ООО «Интерстиль».

Pavlov Yaroslav Vladimirovich, The engineer-technologist of Open Company "Interstyle"

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 532.517.4:532.13 + 504.05

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ЭКОЛОГИИ И ТЕХНОГЕННО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ-АКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

© 2018 *А.П. Симоненко, П.В. Асланов, А.Ю. Собко, С.А. Фоменко*

Энергетический кризис, резкое ухудшение экологического состояния окружающей среды, недостаточная эффективность средств предупреждения и ликвидации последствий природных катастроф (массовых пожаров, землетрясений, наводнений и т.д.) и техногенных аварий в последние десятилетия стали одними из важнейших проблем фактически для всех стран нашей планеты. Низкая эффективность, с экологической и энергосберегающей точек зрения, технологий и технических средств, которые используются в промышленных масштабах, а также для решения техногенно-экологических проблем может угрожать национальной безопасности даже в развитых странах мира.

В представленной статье показано, что создание и использование гидродинамически-активных композиций на основе водорастворимых высокомолекулярных полимеров (ВП) и мицеллообразующих поверхностно-активных веществ (МПАВ) позволяют решить ряд проблем энергосбережения, экологии и техногенно-экологической безопасности при пожаротушении, аварийной откачке сточных вод, решении экологических проблем крупных животноводческих комплексов и т.д.

Ключевые слова: гидродинамически-активные композиции, полиэтиленоксид, полиакриламид, мицеллообразующие поверхностно-активные вещества, экологическая безопасность, энергосбережение.

Состояние проблемы. Выработка энергии для обеспечения энергетических потребностей человечества обеспечивается, в основном, за счет трех видов энергоресурсов – органического топлива, энергии потока воды и энергии атомного ядра. Каждый из этих трех способов получения энергии наносит вред окружающей среде, что особенно проявляется при аварийных ситуациях. При работе в штатном режиме наибольший вред наносят тепловые электростанции, поскольку при сжигании органического топлива в окружающую среду поступают продукты сгорания, которые загрязняют атмосферный воздух, землю, водоисточники.

Известно, что около 75% электроэнергии в мире (в Российской Федерации – 80%) производится на тепловых электростанциях. Для этого ежегодно сжигается порядка 7 млрд. т. условного топлива. При этом коэффициент полезного действия тепловых электростанций составляет всего 40%. Следовательно 60% тепла от сжигания топлива рассеивается в окружающей среде.

Существенное загрязнение природной среды происходит при природных стихийных бедствиях, а также при техногенных катастрофах. Недостаточная эффективность, с экологической точки зрения, технологий и технических средств по предупреждению и ликвидации последствий стихийных бедствий и техногенных катастроф, угрожает национальной безопасности даже развитым странам мира.

Важным резервом для уменьшения техногенной нагрузки на окружающую среду является повышение эффективности использования электрической и тепловой энергии. Согласно данным международной энергетической ассоциации последовательное

осуществление мероприятий по энергосбережению могло бы уменьшить глобальное энергопотребление на 40%, без ухудшения качества жизни людей.

Значительная часть электроэнергии используется в трубопроводном транспорте (тепло- и холодоснабжение, нефте- и продуктопроводы, системы канализации и водоотведения, гидротранспорт сыпучих материалов и т.д.). Особое место занимают гидравлические системы, эксплуатация которых, с целью жизнеобеспечения населения, предупреждения и ликвидации последствий аварий и катастроф происходит в чрезвычайных ситуациях с ограниченными энергоресурсами. В таких системах большая часть энергии расходуется на преодоление сил гидродинамического сопротивления трения.

Большинство выявленных и проанализированных научных публикаций, а также патентов на изобретения по снижению гидродинамического сопротивления трения (СГСТ) приходится на управление свойствами жидкостей за счет введения в поток гидродинамически-активных добавок (ГДАД), в т.ч. водорастворимых ВП и МПАВ, что свидетельствует об актуальности этого направления.

Кроме вышеупомянутого, ВП в водных растворах обладают рядом уникальных физико-химических свойств, которые могут использоваться в процессах флокуляционной очистки сточных вод от взвешенных твердых примесей, в управлении скоростью биохимических реакций разложения органических отходов, при фильтрации жидкостей через пористые загрузки, создании защитных пленок при транспортировке сыпучих материалов открытым транспортом и т.д.

Целью данной статьи является составление обзора научных публикаций и патентов на изобретения по современному состоянию проблем экологии, техногенно-экологической безопасности и энергосбережения и возможных путей их решения за счет применения водорастворимых гидродинамически-активных композиций на основе высокомолекулярных полимеров и мицеллообразующих поверхностно-активных веществ.

Постановка задачи. Многочисленными исследованиями, выполненными у нас в стране и за рубежом, показано, что из всех известных водорастворимых ВП наибольшую гидродинамическую эффективность проявляют полиэтиленоксид (ПЭО) и полиакриламид (ПАА), которые при содержании в растворе равном ($5 \cdot 10^{-5}$ - 10^{-2}) вес.% обеспечивают снижение гидродинамического сопротивления турбулентного трения в трубах на 60-80% (эффект Томса) [1-4]. Кроме полимеров высокую гидродинамическую эффективность также проявляют мицеллообразующие ПАВ [5-7], затвердевшие частицы и кристаллогидраты транспортируемых жидкостей, суспензии различных минералов, волокон и т.д.

Применение эффекта Томса дает возможность повысить эффективность работы различных гидравлических систем по одному из показателей: уменьшение потребляемой насосами мощности, увеличение длины прямолинейных участков трубопроводов, применение труб меньшего диаметра или увеличение расхода жидкости (табл. 1).

К большому сожалению, в большинстве публикаций, посвященных этой проблеме, приведены результаты исследований с использованием заранее приготовленных однородных растворов полимеров [1-4]. Это в значительной степени снижает практическую ценность этих работ, поскольку применение заранее приготовленных растворов в промышленных масштабах связано с трудоемким процессом их приготовления, требует использования громоздкого оборудования, а

иногда, например, на автономных объектах, реализовать преимущества эффекта Томса по такой схеме практически невозможно.

Таблица 1. Варианты возможного использования явления СГСТ

№ п/п	Величина эффекта сниж. сопротивления, %	Увеличение длины трубопроводов, кол-во раз	Уменьшение внутреннего диаметра труб, %	Увеличение расхода жидкости, кол-во раз	Уменьшение потреб. мощности насосом на перекачку, %
1.	10	1,11	2	1,05	10
2.	20	1,25	4	1,12	20
3.	30	1,43	7	1,20	30
4.	40	1,43	10	1,29	40
5.	50	2,0	13	1,41	50
6.	60	2,5	17	1,58	60
7.	70	3,33	21	1,82	70
8.	80	5	28	2,24	80

На сегодняшний день, несмотря на высокую эффективность, явление СГСТ добавками ПЭО и ПАА не получило должного практического применения. Это связано со сложностями приготовления из них в больших количествах растворов с максимальным сохранением молекулярной массы и потерей такими растворами в процессе хранения свойства уменьшать турбулентное трение воды.

В патентной литературе приведен ряд изобретений, которые посвящены созданию на основе порошкообразных ПЭО и ПАА и различных дисперсионных сред тонкодисперсных суспензий и паст с содержанием полимера до 30% вес., а также составы лакокрасочных материалов для нанесения на твердые поверхности водорастворимых гидродинамически-активных покрытий. Однако приведенные в них результаты носят ограниченный характер, а в ряде случаев противоречивы.

Результаты анализа эксплуатации различных гидравлических систем, в т.ч. и в чрезвычайных ситуациях, показали, что для эффективного использования в них явления СГСТ добавками полимеров, необходимо на их основе создать различные полимерные композиции, использование которых в специальных генераторах позволит за малые промежутки времени (до 20 секунд) получать большие количества полимерных растворов с максимальным сохранением молекулярной массы полимера.

Гидродинамически-активные композиции. Композиции на основе ВП [8-20]. В таблице 2 приведен перечень известных и разработанных в Донецком национальном университете (ДонНУ), полимерных материалов, которые могут использоваться в виде: однородных концентрированных растворов, приготовленных по классической схеме; высококонцентрированных полимерных гелей; жидких водорастворимых полимерных композиций – ЖВПК (равноплотных тонкодисперсных суспензий, тонкодисперсных паст, жидких композиций с повышенным содержанием полимера); твердых водорастворимых полимерных композиций – ТВПК (ультраслабых, легкорастворимых в воде полимерных покрытий, которые получают путем нагревания полимерных суспензий в литевых формах или нанесением на омываемую твердую поверхность движущегося в воде объекта, а также на армирующие вставки проточного генератора приготовления растворов, лакокрасочных материалов; флоковых покрытий с водорастворимыми полимерными наполнителями) и твердых брикетов, которые готовят путем холодного прессования смеси тонкодисперсного порошка и наполнителя.

В колонках 3,4 табл. 2 приведены условные обозначения этих композиций и содержание в них гидродинамически активного полимера, в вес.%.

Таблица 2. Водорастворимые полимерные композиции для решения проблем экологической безопасности и энергосбережения [20]

№ п/п	Наименование полимерного материала (композиции)	Условное сокращение названия композиции	Содержание полимера, % вес.
Однородные растворы и полимерные гели			
1	Однородные концентрированные растворы полимеров, приготовленные по классической схеме	ОКПР	0,05-1,0
2	Высококонцентрированные полимерные гели	ВКПГ	до 8,0
Жидкие водорастворимые полимерные композиции (ЖВПК)			
3	Равноплотные тонкодисперсные полимерные суспензии и эмульсии	РТПС РТПЭ	до 15,0
4	Тонкодисперсные водорастворимые полимерные пасты	ТВПП	до 34,0
5	Жидкие композиции (суспензии) с повышенным содержанием полимера	ЖКПП	35,0-60,0
Твердые водорастворимые полимерные композиции (ТВПК). Полимерные покрытия			
6	Ультраслабые полимерные покрытия, приготовленные нанесением лакокрасочных материалов	УПП (ЛКМ)	30,0-65,0
7	Ультраслабые полимерные покрытия на армирующих вставках, приготовленные нагреванием полимерных суспензий	УПП (НПС)	30,0-60,0
8	Флоковые покрытия с водорастворимыми полимерным наполнителем	ФПП (ВН)	25,0-30,0
Полимерные брикеты			
9	Твердые водорастворимые полимерные композиции – брикеты, приготовленные путем холодного прессования смеси тонкодисперсного полимерного порошка и наполнителя	ТВПБ	90,0-95,0

Проведенными исследованиями было установлено, что ЖВПК и генераторы приготовления из них растворов целесообразно использовать в централизованных системах пожаротушения, водоотведения, канализации и т.д., а ТВПК (в составе проточных генераторов приготовления растворов) в мобильных установках водного пожаротушения и аварийной откачки воды и для повышения эффективности работы гидравлических машин, применяемых при разрезании и разрушении жидкостными струями твердых материалов.

Особого внимания заслуживают результаты экспериментальных исследований по созданию жидких полимерных композиций с повышенным до 50-60% вес. ПЭО (ЖКПП) [16,17]. За счет введения в дисперсионную среду (ДС), вместо тонкодисперсного полимерного порошка, высококонцентрированных включений (ВКВ) – шариков из смеси порошкообразных ПЭО и карбоната кальция диаметром 1-3 мм, которые готовят путем холодного прессования тонкодисперсной смеси под давлением 80-100 кг/см². Отличительной особенностью таких ЖКПП является сравнительно небольшая их вязкость, которая не превышает величину вязкости ТВПП с содержанием тонкодисперсного ПЭО равным 30% вес. В табл. 3 приведены результаты сравнительных испытаний реологических свойств ТВПП (содержание ПЭО – 30% масс.) и ЖКПП с содержанием ПЭО 50% вес.

Из приведенных в табл. 3 данных видно, что величина динамической вязкости η ЖКПП меньше вязкости ТВПП, в качестве дисперсной фазы которой используется тонкодисперсный полимерный порошок, при числах Рейнольдса равных 0,16 – 0,88, а

при дальнейшем увеличении числа Re величины вязкости этих суспензий становятся практически равными.

Таблица 3. Реологические свойства ТВПП и ЖКПП на основе ПЭО (τ – напряжение трения на стенке трубки, η – динамическая вязкость, γ – скорость сдвига, Re – число Рейнольдса). Данные работы [16]

Состав полимерной суспензии		Содержание ПЭО в суспензии, % мас.	γ , 1/с	τ , Па	Re	η , Па·с
Дисперсная фаза	Дисперсионная среда					
Тонкодисперсный порошок ПЭО с размером полимерных частиц до 200 мкм	Смесь глицерина и воды с плотностью 1,22 г/см ³	30,0	23,6	221,2	0,18	9,37
			37,4	242,0	0,41	6,47
			60,2	291,5	0,88	4,84
			60,9	317,5	0,83	5,21
Шарики диаметром 2 мм, полученные прессованием смеси тонкодисперсных порошков ПЭО и карбоната кальция под давлением 90 кг/см ²	Смесь глицерина и воды с плотностью 1,22 г/см ³	50,0	17,4	135,6	0,16	7,84
			30,6	08,2	0,3	,80
			48,1	75,9	0,6	,73
			70,2	35,7	1,0	,78
			101,1	74,7	1,9	,71

Большой интерес также представляют флоковые покрытия с водорастворимыми полимерными наполнителями – ФПП (ВН), которые на армирующих вставках проточных генераторов (кассет), могут эффективно применяться в мобильных установках для тушения пожаров и аварийного откачивания воды, а также в процессе приготовления рабочих жидкостей для гидравлических машин, используемых для гидроразрушения твердых материалов высокоскоростными струями жидкости. При этом в качестве таких наполнителей могут использоваться ТВПП различных составов, в т.ч. и содержащие различные добавки, которые наряду с СГСТ придают воде и другие свойства, например, улучшают ее огнетушащие свойства. В работе [18,19] приведены составы известных и разработанных наполнителей ФПП на основе ПАА и ПЭО. Эти составы показали высокую эффективность в процессе стендовых и натуральных испытаний.

В табл. 4, в качестве примера, приведены составы смесей из которых путем холодного прессования приготавливали ТВПБ (Брикет 1 и Брикет 2). Эти брикеты, с применением генератора, использовались для приготовления однородных водных растворов ПЭО с целью СГСТ воды в трубах.

Таблица 4. Состав и основные свойства ТВПБ полученных холодным прессованием смеси тонкодисперсного порошка ПЭО и едкого натрия (NaOH) [20]

№ п/п	Параметры прессования	Величины параметров	
		Брикет 1	Брикет 2
1.	Концентрация ПЭО в смеси, % вес.	60	80
2.	Концентрация NaOH в смеси, % вес.	40	20
3.	Величина давления прессования, кг/см ²	40	50
4.	Содержание ПЭО в ТВПБ, г/см ³	0,77	1,04

Вместо едкого натрия в составе ТВПБ может быть использована олеиновая кислота, которая также на начальной стадии смешивания с водой предотвращает растворение и слипание частиц ПЭО.

На рис. 1 приведена принципиальная схема рабочего макета проточного генератора приготовления полимерных растворов из ТВПБ.

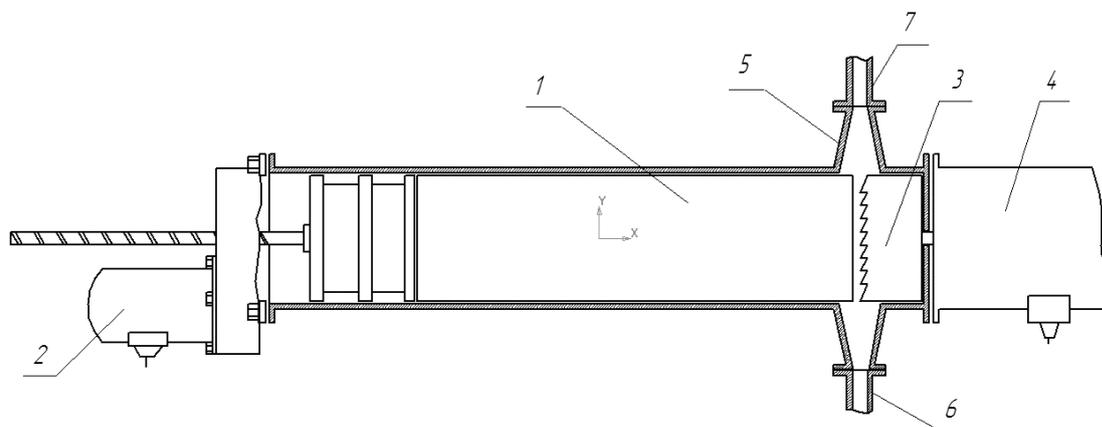


Рис. 1. Принципиальная схема рабочего макета генератора приготовления растворов из ТВПБ. 1 – гидроцилиндр с полимерным брикетом 2 – электродвигатель с редуктором и поршнем для подачи брикета на нож-разрыхлитель (фрезу), 3 – фреза 4 – электропривод, обеспечивающий вращение фрезы, 5 – кавитационный смеситель; 6,7 – патрубки подачи воды и отвода приготовленных полимерных растворов, соответственно

Кроме централизованных систем водного пожаротушения ТВПБ могут эффективно использоваться на самолетах, вертолетах и катерах, которые используют для тушения лесных и крупномасштабных пожаров, а также для улучшения тактико-технических характеристик автономных объектов, движущихся в воде.

Композиции на основе МПАВ [20]. В табл. 5 приведены составы гидродинамически-активных композиций на основе МПАВ и веществ, способствующих образованию в их растворах анизометрических мицелл (электролитов и α -нафтола) для СГСТ воды. В отличие от высокомолекулярных полимеров растворы МПАВ характеризуются обратимой механической деструкцией. Это позволяет применять их в замкнутых гидравлических системах, например, в системах тепло и холодообеспечения, в водокольцевых насосах для откачки метана в угольных шахтах и т.д.

Таблица 5. Составы гидродинамически-активных композиций на основе МПАВ и способствующих мицеллообразованию веществ (СМВ) для СГСТ воды [20]

№ п/п	Состав композиции (МПАВ+СМВ)	Оптимальные концентрации, % вес.			Величина эффекта СГСТ при S_{opt} , %	Температурный диапазон существования эффекта СГСТ, °С
		МПАВ	СМВ	Суммарная		
1.	Цетилпиридиний хлористый + α -нафтол	0,065	0,025	0,09	75	10-50
2.	Цетилпиридиний бромид + α -нафтол	0,060	0,022	0,082	72	25-90
3.	Метаупон+ NaCl	(0,30-3,6)	(7,5-8,3)	(7,8+11,9)	78	3,5-95
4.	Диталан OTS+NaCl	(0,6-2,4)	3,0	3,6-5,4	67	9,5-55

5.	Тетрадецилсульфат натрия+ NaCl	0,08	1,75	1,83	60	40-65
6.	Олеат натрия+KCl	0,2	6,0	6,2	65	20-50

Разработанные в ДонНУ составы теплоносителя и основного хладоносителя шахтных установок кондиционирования воздуха со СГСТ, на основе композиции из МПАВ (метаупона) и СМВ защищены авторскими свидетельствами СССР на изобретения [21,22].

Повышение эффективности работы пожаротушающего оборудования [8,10,12,20,23,24]. Пожары, как неконтролируемые процессы горения различных материалов, уничтожают значительные материальные ценности, создают угрозу для жизни людей, наносят большой вред окружающей среде. Анализ работы огнетушащего оборудования, применяемого оперативными подразделениями Министерства по чрезвычайным ситуациям, показывает его недостаточную эффективность при тушении крупномасштабных пожаров. В первую очередь это связано с ограниченным количеством подачи пожаротушающих жидкостей в очаг пожара и сравнительно низкой их огнетушащей способностью. Кроме этого, для эффективного тушения крупномасштабных пожаров необходимо увеличить дальность брызг струй пожаротушающих жидкостей, которые формируются в пожарных стволах, а также уменьшить количество аварийных ситуаций в мобильных установках пожаротушения, которые связаны с разрывами пожарных рукавов.

Проведенные авторами работы [24] лабораторно-стендовые, полигонные и промышленные испытания показали, что для повышения эффективности использования централизованных систем водного пожаротушения целесообразно использовать ЖВПК (тонкодисперсные суспензии и пасты), а в мобильных установках – ультраслабые покрытия и флоковые покрытия с водорастворимыми полимерными наполнителями в составе проточных генераторов (кассет) приготовления из них растворов, а также твердые полимерные брикеты.

ОКПР на основе ПЭО и ПАА (в т.ч. и их смесей с ПАВ) целесообразно использовать тогда, когда известно, что тушение пожара принимает затяжной характер.

Результаты стендовых и полигонных испытаний показали, что для ввода в трубопроводы и пожарные рукава однородных концентрированных полимерных растворов могут эффективно использоваться пеносмесители ПС-1 и ПС-2, которые широко применяются в противопожарной технике, а при использовании ультраслабых покрытий и флоковых покрытий – проточные кассеты общий вид одной из которых приведен на рис.2.

Испытания на участке пожарно-оросительного трубопровода шахты им.М.И.Калинина ГП «Донецкуголь» показали, что за счет введения в воду ЖВПК, на основе ПЭО, можно достичь уменьшения гидравлических потерь на 50-70%. Это позволяет: либо увеличить расход пожаротушающей жидкости по трубопроводу в (1,41-1,82) раза, либо уменьшить для перекачивания жидкости насосами мощность на 50-70)%, либо увеличить прямолинейные участки трубопровода в (2,0-3, 3) раза, либо уменьшить внутренний диаметр используемых труб на (13-21)%.

Полигонные испытания проточного генератора с армирующими вставками, на которые были нанесены ультраслабые полимерные покрытия на основе ПЭО, проводились с использованием пожарного автомобиля АЦ совместно с подразделением военизированной пожарной охраны Донецкой железной дороги (г. Ясиноватая, Донецкой обл.).

Результаты испытаний (см. табл. 6) показали, что при подаче по рукавной линии длиной 250 м и внутренним диаметром 51 мм за счет введения гидродинамически-активного ПЭО из ультраслабого покрытия, которое размывается в проточной кассете, можно увеличить расход огнетушащей жидкости на 39% , а дальнобойность струи – на 28% (по сравнению с водой). При этом гидравлические потери давления в рукавной линии уменьшаются на 17%. Таким образом, следует ожидать, что при оптимальных условиях применения гидродинамически-активные полимерные композиции обеспечивают увеличение расхода огнетушащих жидкостей по рукавной линии, которые подаются в очаг пожара, (в 1,5-2,0 раза) и увеличивают дальнобойность струй на 30-40 % [24].

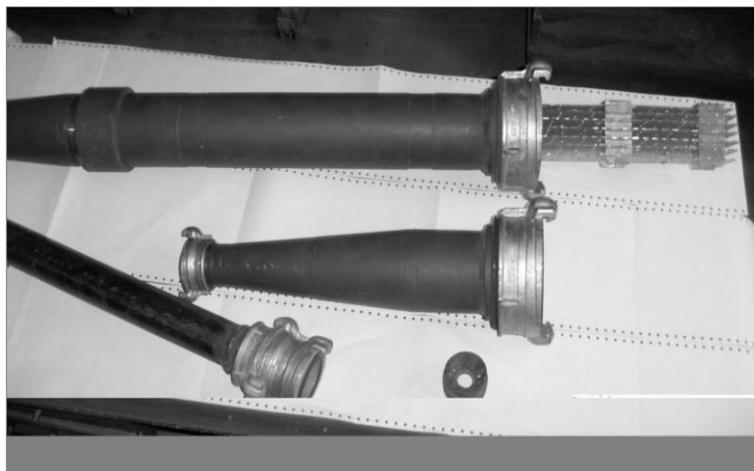


Рис. 2. Общий вид проточной кассеты для приготовления пожаротушащих жидкостей с использованием УПП (НПС) и ФПП (ВН) [20]

Таблица 6. Результаты полигонных испытаний пожаротушащих жидкостей Р – давление в начале рукавной линии, Q – расход пожаротушащей жидкости в рукавной линии, L – дальнобойность струи [24]

№ п/п	Р, кг/см ²	Р _с , кг/см ²	Q, л/с	L, м
Огнетушащая жидкость – вода				
1	2	1,4	1,3	19
2	4	3,0	2,7	21
3	6	4,8	3,3	25
4	8	6,6	4,4	31
Огнетушащая жидкость – водный раствор ТВПК				
5	4	3,0	3,60	27
6	6	5,0	4,55	32
8	8	7,8	4,60	33

Известно, что эффективность тушения пожара в значительной степени зависит от огнетушащих свойств жидкостей. Проведенные полигонные испытания водных растворов полимерных композиций в качестве пожаротушащих жидкостей показали, что при тушении шахтной транспортёрной ленты, отработанного индустриального масла, поленьев акации, время тушения моделируемых очагов пожара, уменьшается в среднем в 1,6 раза, а количество использованной для этих целей воды – в 1,5 раза [20,24].

Ежегодно в Донбассе происходит от 30 до 60 подземных пожаров, которые приводят к гибели людей, наносят экономический ущерб угольным предприятиям Министерства топлива и энергетики в размере от 20 до 40 млн. гривен. При этом из технологического цикла шахт на длительное время выводятся лавы и штреки, которые оснащены оборудованием большой стоимости и подготовлены к добыче угля. Особые сложности представляет тушение эндогенных подземных пожаров, которые возникают в результате самовозгорания угольного массива. Кроме тушения пожара водой, пеной и водными растворами ПАВ в таких случаях возникает необходимость изолировать очаг пожара перегородками из гипса с использованием комплексов СНУ «Темп-500», «Темп-200» и т.д.

Улучшить технические и экономические показатели процесса тушения подземных пожаров в угольных шахтах можно за счет использования полимерных композиций для СГСТ огнетушащих жидкостей в трубах (рукавах) и улучшения их огнетушащих свойств. Кроме этого такие композиции и композиции на основе смесей полимеров с коагулянтами можно эффективно применять для очистки шахтной воды, с целью ее использования для тушения подземных пожаров. Микродобавки полимерных композиций на основе ПЭО могут также значительно повысить эффективность работы комплексов типа СНУ «Темп-500» [20].

Полигонные испытания, по определению влияния микродобавок ПЭО из водорастворимых полимерных композиций на транспортировку гипсовых растворов в пожарных рукавах, проводились с использованием комплекса СНУ «Темп-500». Такие комплексы широко применяются для возведения безрубровых перегородок из гипса при изоляции пожаров в угольных шахтах.

Результаты испытаний показали, что растворение фосфогипса в слабоконцентрированных растворах ПЭО, уменьшает гидравлические потери в рукавной линии длиной 140 м и внутренним диаметром 51 мм с $0,5 \text{ кг/см}^2$ до $0,25 \text{ кг/см}^2$, т.е. на 50%, а потребляемый СНУ ток с 17А до 14А, т.е. на 18%.

При этом установлено, что ввод в затворяющую гипс воду микродобавок полимерных композиций на основе ПЭО не изменил время выхода СНУ на оптимальный режим работы.

Таким образом, если вместо воды, в процессе приготовления гипсовых растворов, использовать слабоконцентрированные ($0,0002 - 0,00075$ вес. %) растворы высокомолекулярного ПЭО можно в 1,2-1,5 раза увеличить промежуток времени с момента начала растворения гипса до начала его схватывания. Это позволяет в процессе транспортировки гипсового раствора по рукавным линиям уменьшить гидравлические потери на 45-60%. Кроме этого применение микродобавок полимеров приводит также к повышению на (10-25)% прочности образующегося гипсового камня.

Снижение гидравлических потерь в напорных трубопроводах систем водоотведения и канализации [20,25-28]. В период сильных паводков и ливней часто происходит перенаполнение систем водоотведения и канализации, которые вызывают затопление водой и коммунально-бытовыми стоками территорий промышленных предприятий и жилых массивов. При этом уничтожаются материальные ценности, возникает угроза жизни людям, загрязняется окружающая среда. Важным резервом предотвращения перенаполнения трубопроводных систем канализации и водоотведения может быть использование явления снижения ГСТТ добавками гидродинамически-активных композиций.

В ряде работ, выполненных у нас в стране и за рубежом [1-4], за счет введения в трубопроводы заранее приготовленных однородных растворов высокомолекулярных ПЭО или ПАА показана принципиальная возможность повышения пропускной

способности канализационных систем и систем водоотведения. Однако, из-за необходимости использования для приготовления и хранения растворов полимеров громоздкого оборудования и потере ими свойства СГСТ во времени такой способ оказался малоперспективным.

В ДонНУ [20] были созданы быстрорастворимые ЖВПК, которые в составе специальных генераторов обеспечивают за малые промежутки времени (до 20 секунд) приготовление однородных растворов ПЭО и ПАА с максимальным сохранением их молекулярной массы. Такие ЖВПК с генераторами могут эффективно использоваться для повышения пропускной способности трубопроводов централизованных канализационных систем и систем водоотведения при чрезвычайных ситуациях, т.е. в период так называемых «пиковых нагрузок», вызванных техногенными авариями, большими паводками или ливнями.

В табл. 7 приведены результаты лабораторных исследований зависимости величины эффекта СГСТ \mathcal{E} ,% от концентрации ПЭО с молекулярной массой 4,8 млн. (производства НИИ химической технологии, г. Новосибирск, Россия) в шахтной воде (из системы водоотведения шахты им. М.И.Калинина) и в воде из канализационного коллектора г.Донецка.

Таблица 7. Зависимость величины эффекта СГСТ \mathcal{E} ,% от концентрации ПЭО $C_{\text{ПЭО}}$,% вес. в шахтной воде (1) и в воде канализационного коллектора (2). Данные получены на турбулентном реометре с диаметром капилляра $d = 1,2$ мм и его длиной $L = 0,5$ м. Температура исследуемых растворов $t = 22$ °С [26]

№ п/п	$C_{\text{пэо}},\%$	$5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}
1	$\mathcal{E},\%$	40	47	52	66	71	75	76	75	69
2	$\mathcal{E},\%$	38	44	47	62	70	74	75	75	70

Из, приведенных в таблице, данных видно, что максимальная величина \mathcal{E} ,% достигается в растворах при концентрациях ПЭО $C_{\text{ПЭО}}$ равных 0,001-0,007 вес.%.

Такая же величина эффекта была получена при использовании в качестве гидродинамически-активной добавки ПАА с молекулярной массой 4,2 млн., который был синтезирован в опытном производстве НИФХИ им. Л. Я. Карпова (г. Москва).

Промышленные испытания гидродинамической эффективности ЖВПК, содержащей 5% вес. ПЭО и 95% вес. смеси глицерина и воды, с плотностью 1,23 г/см³ проводили на участке трубопровода системы водоотведения шахты им. М.И. Калинина ГП «Донецкуголь» общей протяженностью 710 м. Выбранный участок состоял из труб диаметром 150 и 100 мм, длина которых соответственно была равна 230 и 480 метров. Для увеличения скорости растворения ПЭО полимерную суспензию перед испытанием нагревали до температуры 55°С, выдерживали при этой температуре в течении одного часа, а затем охлаждали до комнатной температуры.

Результаты испытаний показали (данные эксперимента приведены в табл. 8), что величина эффекта снижения гидродинамического сопротивления трения (\mathcal{E} ,%), на всем испытываемом участке, через 5 минут составила 12%, а через 15 мин. – 55% (при равных расходах воды и раствора полимерной композиции).

Таблица 8. Зависимость величины эффекта СГСТ, \mathcal{E} ,% от времени введения добавок (τ , мин.) в трубопровод. Данные получены на участке трубы диаметром $d=100$ мм и длиной $L=200$ м. Температура испытываемых жидкостей $t = 28,5$ °С [26]

τ , мин.	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80

Э, %	12	37	55	57	60	59	58	60	59	60	60	60	60	60	59	60
------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Очевидно, что аналогичные результаты можно получить и при использовании ЖВПК в напорных трубопроводах канализационных систем, которые (по сравнению с системами водоотведения шахт) отличаются значительно большей длиной прямолинейных участков труб и меньшей минерализацией сточных вод. Следует ожидать, что эффективность применения ЖВПК в этих системах будет выше.

Таким образом, применение гидродинамически-активных полимерных композиций на основе ПЭО и ПАА открывает широкие перспективы повышения эффективности работы канализационных систем, сетей аварийного откачивания воды без привлечения дополнительных мощностей и существенного изменения их конструкции. При этом для каждого конкретного случая применения необходимо подобрать наиболее эффективную гидродинамически-активную полимерную композицию, которая обеспечит максимальное снижение гидравлических потерь в напорных трубопроводах [10].

Для предупреждения и ликвидации последствий затопления, кроме централизованных систем водоотведения, широко применяются мобильные установки аварийного откачивания воды и сточных вод. Обычно они представляют собой простейшие гидравлические системы, которые включают насос и трубопровод (или рукавную линию – пожарный рукав) для отвода воды. Проведенные лабораторные исследования и натурные испытания показали, что повысить эффективность использования таких установок становится возможным за счет применения проточных генераторов (кассет) для ввода в перекачиваемую жидкость микродобавок высокомолекулярных ПЭО и ПАА путем размыва ультраслабых полимерных покрытий или водорастворимых полимерных наполнителей из флоковых покрытий. Такие покрытия наносятся на армирующие вставки, которые размещаются в корпусе проточной кассеты.

Следует отметить, что такое приготовление полимерных растворов может также эффективно использоваться в процессе приготовления модифицированных полимерными добавками рабочих жидкостей для гидроимпульсных машин (ГИМ) и гидроразрезного оборудования.

На рис. 3 представлена зависимость величины эффекта СГСТ $\Delta\lambda/\lambda, \%$ на контрольном участке трубопровода мобильной установки от времени активной работы генератора t , мин. с флоковым покрытием в качестве наполнителя которого использовалась тонкодисперсная равноплотная суспензия ПЭО в дисперсионной среде – смеси глицерина с водой [25].

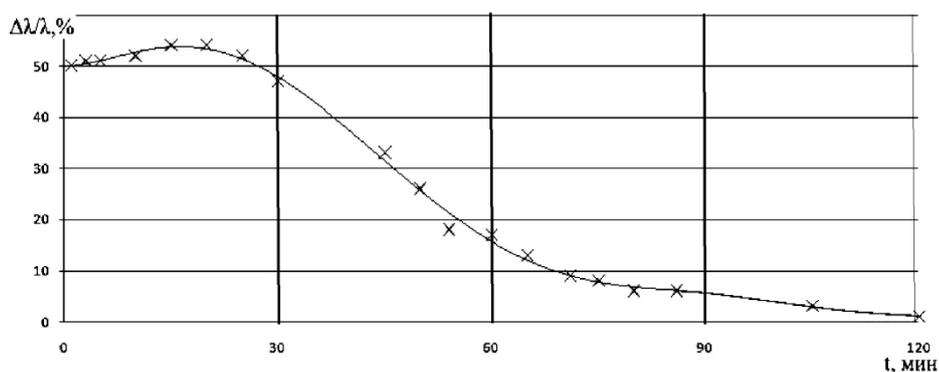


Рис. 3. Зависимость величины относительного уменьшения турбулентного трения $\Delta\lambda/\lambda, \%$ от времени активной работы генератора с флоковым покрытием t , мин. (полимерный наполнитель флокового покрытия – тонкодисперсная суспензия порошка ПЭО с молекулярной массой 4,5 млн. в смеси глицерина с водой (плотность 1,22 г/см³), размер полимерных частиц ≤ 63 мкм). Данные работы [25]

Видно, что в течение первых 30 минут раствор ПЭО, который образуется за счет растворения наполнителя флокового покрытия, характеризуется существенным снижением гидродинамического сопротивления трения (величина $\Delta\lambda/\lambda, \%$, в этом промежутке времени равна 46-55%). Начиная с 30 минуты величина $\Delta\lambda/\lambda, \%$ в приготовленном растворе постепенно уменьшается. На 60 мин., с начала проведения эксперимента, она составляет 17,5%, а на 120 мин. $\Delta\lambda / \lambda, \% = 0$.

Улучшение виброакустических характеристик гидравлических систем [30-32]. В последние годы проблеме изучения шума и вибрации, разработке технологий уменьшения их уровня уделяется большое внимание. Интерес исследователей связан не только со снижением воздействия шума и вибрации на организм человека, с целью разработки и внедрения современных технологий и технических средств по безопасным условиям труда, но и с разработкой научных основ создания совершенных конструкторских решений для выпуска различных машин и оборудования с улучшенными виброакустическими характеристиками (ВАХ).

Одними из основных источников шума и вибрации являются гидравлические системы. Шумы гидродинамического происхождения по природе образования принято делить на вихревые шумы, шумы от неоднородностей потока и звук вращения.

По мнению специалистов, занимающихся проблемами виброакустики, самым эффективным способом улучшения ВАХ гидравлических систем является способ уменьшения шума и вибрации в источнике их возникновения. Реализацию этого метода можно осуществить посредством воздействия на процессы, протекающие в проточных частях машин и в магистральных трубопроводах, изменением их конструктивных параметров, а также применением чисто акустических способов вибро- и шумозащиты.

Анализ работ, посвященных исследованиям источников шума и вибрации гидродинамического происхождения, показал, что к основным аэрогидродинамическим источникам, ухудшающим ВАХ гидравлических систем, следует отнести: пульсации турбулентного потока; пульсации давления пограничного слоя на обтекаемых поверхностях; пульсации давления на лопатках рабочих колес и спрямляющих элементах вследствие срыва или схода вихрей пограничного слоя; пульсации давления, вызываемые взаимодействием неоднородного потока с обтекаемыми телами; вращение твердых тел в жидкой среде; кавитационные процессы в проточных частях машин и систем; термические процессы; процессы выпуска воздуха (газа) или жидкости через клапаны и т.д.

Многочисленными исследованиями, выполненными у нас в стране и за рубежом, установлено, что одним из наиболее эффективных и сравнительно легко реализуемых способов улучшения ВАХ, за счет уменьшения шума и вибрации в источнике, может быть использование в качестве рабочих жидкостей гидравлических систем растворов высокомолекулярных гидродинамически-активных полимеров (полиэтиленоксида – ПЭО, полиакриламида – ПАА и т.д.). Так, например, в водных растворах высокомолекулярного ПЭО при его концентрации $C = 5 \cdot 10^{-5}$ г/см³ и среднерасходной скорости течения $U_{cp} = 3-10$ м/с спектральные уровни мощности пульсаций давления на низких и средних частотах снижаются в 5-8 раз, на высоких (при $f = 10^4$ Гц) в 100 раз [32].

Однако, указанный выше способ не может быть использован для замкнутых гидравлических систем, включающих насосы для перекачки рабочих жидкостей. Это

обусловлено деструкцией (разрывом) полимерных молекул при их прохождении через насосы, приводящей, в конечном итоге, к полной потере добавками способности снижать как гидродинамическое сопротивление трения, так и уровни пульсаций давления в потоке.

В работах [33,34] показано, что устранить указанные выше недостатки можно путем использования в качестве рабочих жидкостей водных растворов мицеллообразующих поверхностно-активных веществ, которые обладают свойством восстанавливать свою гидродинамическую эффективность после прохождения через насосы [6,7].

Так, например, в качестве рабочей жидкости предлагается использовать водные растворы МПАВ - натриевой соли β -[N-метил-N-олеоил] этилсульфоокислоты, которые дополнительно содержат хлористый натрий и едкий натр при следующем соотношении компонентов (в вес. %):

– натриевая соль β -[N-метил-N-олеоил] этилсульфоокислоты	0,1-2,0;
– хлористый натрий (<i>NaCl</i>)	4,0-16,0;
– едкий натр (<i>NaOH</i>)	0,005-0,15;
– вода	остальное.

Результаты экспериментов [30,31] показали, что при использовании в качестве рабочей жидкости раствора ПАВ указанного выше состава наблюдается значительное улучшение (по сравнению с водой) виброакустических характеристик:

– при скорости течения 5-7 м/с уровень вибраций трубопровода снизился на 6-8 дБ в диапазоне частот 60-200 Гц, на 15-18 дБ в диапазоне 200-1500 Гц и на 6-12 дБ в диапазоне частот 1500-20000 Гц;

– при скорости потока 3-4 м/с уровни вибраций трубопровода практически легли на уровень помех;

– уровни вибраций центробежного насоса уменьшились на 4-6 дБ в диапазоне частот 40-1000 Гц и на 8-10 дБ в диапазоне 1000-20000 Гц;

– уровень пульсаций давления в потоке снизился на 28 дБ в диапазоне частот 500-20000 гц; на частотах до 500 Гц сигнал лег на уровень помех;

– энергия, затрачиваемая на циркуляцию рабочей жидкости с добавкой ПАВ, снизилась в 2,6 раза вследствие уменьшения гидравлического сопротивления трубопровода на 75-78%.

Рабочая жидкость (раствор смеси МПАВ с хлористым натрием и едким натром указанного выше состава) непрерывно циркулировала по замкнутому контуру гидроакустического стенда в течение 310 часов. При этом наблюдалось стабильное снижение гидродинамического сопротивления, уровней вибраций и пульсаций давления в течение всего указанного временного цикла испытаний.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что добавки МПАВ могут найти широкое практическое применение в замкнутых гидравлических системах для улучшения их виброакустических и гидродинамических характеристик.

Совершенствование гидроструйных технологий [10,20,35-37]. Для повышения эффективности работы гидроимпульсной техники, предназначенной для разрушения твердых материалов, в т.ч. и при добычи каменного угля, были использованы ТВПК в виде УПП (НПС), которые наносились путем нагревания полимерной суспензии в литьевых формах на армирующие вставки проточного генератора приготовления полимерных растворов.

В ходе испытаний оценивалась эффективность использования струй (с полимерными добавками и без них) для разрушения блоков из гипса и углецементной смеси. Результаты этих исследований представлены на рис. 4 и рис.5.

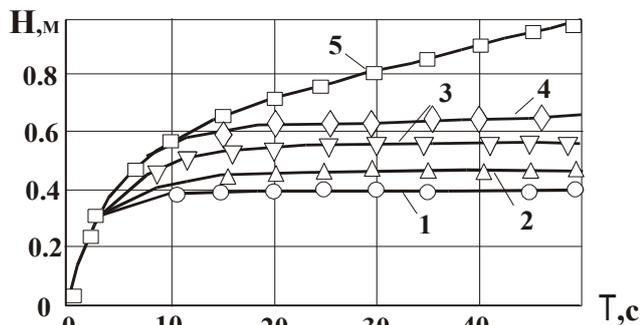


Рис. 4. Зависимость глубины отверстия H , м, пробиваемого в гипсовом блоке, от времени действия гидроструи T , с. 1 – вода, 2, 3 – 0,002 и 0,004% вес. водные растворы ПЭО, 4 и 5 – растворы, приготовленные из ТВПК в проточной кассете [20]

На рис. 4 приведены зависимости величины глубин отверстий H , м, которые пробивались в гипсовом блоке от времени действия струи T , с. Кривая 1 получена для водной струи; кривые 2 и 3 – при применении струй, сформированных из заранее приготовленных однородных растворов ТВПК с содержанием ПЭО, соответственно, 0,002% и 0,004% вес.. Кривые 4 и 5 соответствуют струям из растворов ТВПК, которые были приготовлены в проточных кассетах, когда с момента первого контакта материала ТВПК с водой составило 25

минут и 4 часа, соответственно. Начальное расстояние от среза сопла до поверхности гипсового блока в процессе испытаний было постоянным и равным 0,14 м. Из рис. 4 видно, что импульсные струи, которые были сформированы ГИМ из заранее приготовленных однородных растворов ТВПК, имеют более высокую разрушающую способность по сравнению с водной струей. Однако глубина отверстия H , которое пробивалось в гипсовом блоке, при этом увеличилось на незначительную величину.

Очевидно, что это связано с механической деструкцией макромолекул ПЭО в насосной установке высокого давления. Таким образом, использование заранее приготовленных растворов ПЭО считается нецелесообразным, а проточные кассеты с брикетами, с целью сохранения качества раствора, необходимо устанавливать после насоса высокого давления. Увеличение времени контакта материала ТВПК с водой повышает эффективность разрушения гипсового блока. Это связано с повышенной массоотдачей ПЭО из ТВПК, что приводит к увеличению содержания гидродинамически-активного полимера в растворе.

Дальнейшие исследования разрушающей способности водных струй и струй из растворов ТВПК проводились с использованием двух углецементных блоков, которые

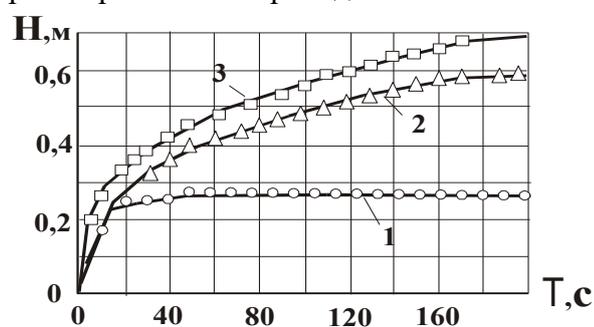


Рис. 5. Зависимость глубины отверстия H , м, пробиваемого в углецементном блоке, от времени действия струи T , с. 1-вода, 2 и 3 растворы с ТВПК, которые были приготовлены в проточных кассетах [20]

были изготовлены из смеси цемента (марка 400) и антрацита (размер частиц угля 6-10 мм) в различных соотношениях. Такие блоки моделируют угольные пласты с разной прочностью. Начальное расстояние от среза сопла до поверхности углецементного блока было равно 0,14 м.

На рис.5 приведена зависимость величины глубин отверстий (H), которое пробивалось в углецементном блоке (с коэффициентом прочности по шкале М.Протодряконова равным 1,6) от времени действия струи (T , с.). Кривая 1

соответствует разрушению блока струей чистой воды; кривые 2 и 3 – струями из растворов ТВПК, которые были приготовлены в 2-х кассетах. При этом кривая 3 относится к случаю, когда центр отверстия, которое пробивалось в блоке, находился на расстоянии 0,35 м от бокового и верхнего ребер куба, а кривая 2 – на расстоянии 0,5 м.

Из приведенных на рисунке данных видно, что если в качестве рабочей жидкости использовать водные растворы ТВПК, то глубина отверстия, которое пробивается в блоке, в 1,5-3,5 раза (в зависимости от продолжительности работы ГИМ) больше глубины отверстия, которое пробивается струей чистой воды.

Особый интерес представляют результаты эксперимента по разрушению углицементного блока, у которого коэффициент прочности равен 2,5, при увеличении до 0,22 м начального расстояния от среза сопла до поверхности блока. Этот блок моделирует угольный пласт повышенной прочности. Разрушение блока проводили до момента прекращения роста глубины отверстия. Наибольшая глубина отверстия, которое было пробито импульсной струей воды, равна 0,22 м, а струей водного раствора ТВПК – 0,71 м.

Таким образом, использование в качестве рабочей жидкости водных растворов гидродинамически-активного ПЭО, позволяет существенно повысить эффективность работы ГИМ путем увеличения глубины отверстия, которое пробивается в твердом материале (за счет значительного СГСТ в проточных частях основных узлов ГИМ и в трубопроводах), а также в результате улучшения геометрических и динамических параметров струи.

Решение экологических проблем крупных животноводческих комплексов [10,20,38-40]. В связи с концентрацией и переводом животноводства на промышленную основу наиболее мощными источниками загрязнения окружающей среды в сельской местности стали крупные животноводческие комплексы. Так, например, количество жидкого навоза на одном свиноводческом комплексе по откорму 108 тыс. свиней в год достигает 300 тонн в сутки, а на комплексе по откорму 10 тыс. голов молодняка крупного рогатого скота – 250 тонн в сутки. В США отходы животноводства составляют около 2 млрд. т. в год. При этом из них более 50% приходится на крупные животноводческие комплексы.

Для улучшения экологической обстановки на крупных животноводческих комплексах необходимо: разработать и внедрить способ уменьшения выделения вредных газов из разлагающегося навоза; усовершенствовать технологический процесс очистки навозных стоков от твердых примесей, с последующим уплотнением образовавшегося осадка, а также усовершенствовать способ пылеподавления в помещениях и на прилегающих к комплексам территориях.

Проведенные исследования показали, что в воздухе животноводческих помещений содержится большое количество вредных и дурно-пахнущих газов. Так например содержание аммиака, выделяемого из навоза, может в десятки раз превышать предельно допустимую концентрацию (ПДК) [20,38].

Оценка риска показала, что за счет загрязнения атмосферного воздуха аммиаком, в свиноводческих помещениях коэффициент опасности равен 118,5. Такое значение коэффициента соответствует очень высокой степени риска при ингаляционном влиянии этого соединения на организм человека и требует принятия безотлагательных мер по улучшению микроклимата в обследованных животноводческих помещениях [38].

На животноводческих комплексах накапливается очень большое количество навозных стоков, которые представляют значительную угрозу окружающей среде. Такие стоки имеют слабую щелочную или нейтральную реакцию, являются сложными

дисперсными системами, их прозрачность близка к нулю, содержание взвешенных веществ лежит в пределах (6-15) г/л, биологическое потребление кислорода $24O_2$ г/л. В большинстве случаев навозные стоки образуют седиментационно и агрегативно устойчивые дисперсии.

В работе [20] в процессе проведения экспериментальных исследований для очистки навозных стоков, которые, в основном, представляют собой органодисперсии, обоснован выбор катионактивного флокулянта, который получают модификацией ПАА - путем полимераналогичных преобразований. Модифицированный ПАА (МПАА) проявляет ярко выраженные катионактивные свойства (за счет модификации амидных групп), имеет линейную структуру макромолекул, характеризуется высокой молекулярной массой (величина которой лежит в интервале 2-4 млн.), отличается сравнительно малыми оптимальной дозой и продолжительностью перемешивания с навозным стоком.

В табл. 9 приведены результаты экспериментальных исследований реагентной очистки навозных стоков свинокомплекса от взвешенных твердых веществ с использованием МПАА.

В работах [39,40] приведены результаты исследований по уменьшению выделения вредных газов в животноводческие помещения. Авторами разработаны составы полимерных композиций, водные растворы которых уменьшают скорость биохимического разложения навоза. Желаемый результат достигается за счет введения в воду, предназначенную для заполнения траншей навозоаккумуляторов, микродобавок высокомолекулярных ПЭО и ПАА, или смеси ПЭО с едким натрием. Так, например, введение на один литр навозного стока 2,5 мг ПЭО в 5-6 раз уменьшает объем выделенных вредных газов. При этом влияние полимерной добавки на биохимическую реакцию разложения навоза сохранялось в течение 6 суток (в ходе проведения эксперимента). Вышеупомянутый состав защищен патентом Украины на полезную модель [39].

Таблица 9. Результаты экспериментальных исследований по очистке навозных стоков МПАА [20]

№ п/п	Основные характеристики		Экспериментальные данные
1.	Влажность осадка, %	В исходном стоке	98,5
		После обработки флокулянтам и фильтрации	75
2.	Содержание суспендированных веществ, мг/л	В исходном стоке	13000
		После обработки флокулянтам и фильтрации	150
3.	Коэффициент задержки суспендированных частиц, %	В исходном стоке	13
		После обработки флокулянтам и фильтрации	98,5
4.	Прозрачность фильтрата, %	В исходном стоке	0
		После обработки флокулянтам и фильтрации	35

В табл. 10 приведены результаты экспериментальных исследований по воздействию едкого натрия, микродобавок ПЭО и их смеси на процесс выделения вредных газов из навоза.

Таблица 10. Влияние продолжительности выдержки образцов навозных стоков (до и после обработки реагентами) на величину избыточного давления, создаваемого в результате выделения вредных газов [39]

№ п/п	Исследуемая жидкость для заполнения траншей-накопителей навоза	Продолжительность выдержки образцов, мин.									
		20	60	100	140	180	220	260	300	340	380
		Величина избыточного давления, см. водного столба									
1.	Вода	16	38	59	75	87	98	107	114	122	128
2.	Водный раствор ПЭО (2,5 мг/л)	11	15	18	20	20	20	20	20	20	20
3.	Водный раствор едкого натрия (9 г/л)	14	22	31	38	43	46	48	50	51	51
4.	Водный раствор смеси ПЭО (2,5 мг/л) и едкого натрия (9 г/л)	8	10	11	12	12	12	12	12	12	12
5.	Водный раствор смеси ПЭО (2,5 мг/л) и едкого натрия (4,5 г/л)	9	11	11	11	12	12	12	12	12	12

Совершенствование технологии очистки отработанных технических масел [20, 41-43]. Загрязнение природной среды нефтью и нефтепродуктами является одной из важнейших проблем экологической безопасности. Это связано с тем, что углеводы и продукты их разложения, в процессе эксплуатации и длительного хранения, образуют соединения с повышенной токсичностью. Ежегодно в мире в биосферу попадает свыше 6 млн. тонн нефтепродуктов. Из них больше половины приходится на отработанные смазочные материалы, значительную долю в которых составляют загрязненные технические масла.

В работах [20,41-43] представлен усовершенствованный способ регенерации отработанного моторного масла M14B2 путем его обработки аминспиртами в количестве 0,5-1,0 вес.%, с последующим выделением очищенного масла, который отличается тем, что в отработанное масло дополнительно вводят водный раствор ПЭО с концентрацией 0,001 – 0, 01 вес. % в количестве до 0,5 вес. %, на исходное сырье. Так, например, введение в загрязненное масло 1,0 вес.% триэтаноламина позволяет достичь степень его очистки равную 89,1%. Введение в 1000 г исходного отработанного моторного масла, нагретого до 60°C, смеси 5 г триэтаноламина и 5 г водного раствора ПЭО, с концентрацией 0,01% вес., с последующим центрифугированием, обеспечивает увеличение степени его очистки до 98,9%. При этом оптический показатель загрязнения (по ГОСТ 24943-81) в исходном сырье составляет 1200, а в очищенном масле – 78.

Этот способ очистки защищен патентом Украины на изобретение и декларационным патентом Украины на изобретение [42,43].

В табл. 11, в качестве примера, приведены данные физико-химических свойств исходных отработанных и очищенных (с применением композиционного реагента) образцов трех партий выбракованных дизельных масел M14B2, с различным содержанием загрязняющих веществ и воды. Очистка производилась по разработанной технологии в условиях Еленовского дорожного цеха очистки технических масел Донецкой железной дороги.

Из приведенных в таблице данных видно, что предложенная технология обеспечивает очистку всех трех образцов исходного загрязненного дизельного масла M14B2 до нормативных показателей.

Таблица 11. Физико-химические свойства отработанных и очищенных масел М14В2

№ п/п	Контролируемый параметр	Образец №1		Образец №2		Образец №3	
		Исходное	Очищенное	Исходное	Очищенное	Исходное	Очищенное
1.	Содержание загрязняющих веществ в масле (оптическая плотность)	1568	69	1199	23,1	1650	37
2.	Концентрация воды, % вес.	3,2	0	0	0	4,1	0
3.	Водородный показатель (рН)	6,0	7,4	5,2	7,2	5,8	8,3
4.	Щелочное число, мгКОН/г	1,15	1,83	0,62	2,54	1,2	1,9
5.	Вязкость, с Ст	15,5	12,7	15,7	11,8	15,6	12,9
6.	Температура вспышки, С°	173	193	202	220	195	212

Кроме очистки моторных масел были проведены опыты по очистке от диспергированных твердых загрязняющих веществ отработанных масел, которые используются в оборудовании металлургических предприятий.

В качестве примера, в табл. 12 приведены результаты исследований по очистке выбракованного масла И-40 из смазочного подвала обжимного цеха Донецкого металлургического завода (ДМЗ).

Таблица 12. Физико-химические свойства отработанных и очищенных масел И-40 [20]

№ п/п	Показатели масла	Данные лаборатории ДМЗ		Данные лаборатории ДонНУ
		Отработанное	Очищенное	Очищенное
1.	Вязкость кинематическая, мм/с	10,01	9,86	9,9
2.	Кислотное число, мг КОН/г	0,09	0,03	0,03
3.	Температура вспышки в открытом тигле, °С	234	230	231
4.	Плотность при 20°С, г/см ³	0,877	0,86	0,86
5.	Содержание воды, % вес.	0	0	0
6.	Содержание диспергированных твердых веществ (по ГОСТ 17217-71), класс чистоты	13	7-8	6-7

Из табл. 12 видно, что в процессе очистки (обработка композиционным реагентом с последующим термоотстоем) исходное отработанное масло из 13 класса было переведено в 7-8 класс чистоты, согласно ГОСТ 17216-71.

Совместно со специалистами ОАО ЗМК «Запорожсталь» были выполнены работы по очистке отработанных технических масел, используемых в оборудовании этого комбината. Содержание диспергированных загрязняющих веществ и воды в этих маслах достигало соответственно 14,3 и 6,25% вес. Обработка специальными реагентами, с последующим термоотстоем, обеспечили очистку всех образцов до 6-8 класса чистоты (согласно ГОСТ 17216-71), что соответствует содержанию загрязняющих веществ в очищенных маслах равном (0,0002-0,0004)% вес. При этом в очищенных маслах полностью отсутствует вода, а кислотное число восстанавливается до нормативных показателей.

Для оборудования, которое используется в условиях производства ДМЗ, разработаны четыре технологических схемы очистки отработанных технических масел.

В работе [20] показана возможность использования очищенных технических масел до полного восстановления их первоначальных свойств, а также приготовления из них эмульсола «ФМИ РЖ» по ТУ 38.1011813-88. При этом установлено, что

регенерированные масла и эмульсол по своим физико-химическим свойствам полностью соответствуют смазочным материалам заводского производства, а их стоимость на 30-45% меньше.

Выводы. В статье показаны перспективы практического применения гидродинамически-активных композиций на основе ВП и МПАВ для решения проблем энергосбережения, экологии и техногенно-экологической безопасности. При этом композиции на основе ВП целесообразно использовать в разомкнутых гидравлических системах пожаротушения, водоотведения, аварийного откачивания воды, а на основе МПАВ в замкнутых системах тепло- и холодоснабжения.

Применение в качестве рабочих жидкостей растворов гидродинамически-активных композиций на основе ВП существенно улучшает геометрические и динамические параметры струй и тем самым улучшает технические характеристики гидроимпульсной техники.

Особый интерес представляют исследования по решению экологических проблем крупных свиноводческих комплексов, (уменьшение выделения вредных и дурнопахнущих газов из органических отходов, очистка навозных стоков от взвешенных твердых частиц), а также по очистке и утилизации отработанных технических масел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Singh R.P. Characteristics of copolymer – polymer, polymer – fibre combinations and grafted polymers as drag reducing agents and their industrial applications / R.P. Singh, P. Chang, G.V. Reddy, etc. // Drag Reduct. 3rd Int. Conf. / [Robert H. J. Sellin](#), [R. T. Moses](#) – Bristol : University of Bristol, 1984. - P. D4/1-D4/5.
2. Liberman M.W. Shear – induced structure formation in solutions of drag reducing polymers [Текст] / M.W. Liberman, E.J. Pollauf, A.J.J. McHugh // Non – Newton. Fluid Mech, 2003.- Vol.113.- №2 – 3. - P.193 – 208.
3. Корнилов В.И. Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) [Текст] / В.И. Корнилов // Теплофизика и аэромеханика. -2005. –Т.12, №2. С.183-208.
4. Козлов Л.П. Гідродинамічний ефект Томса і його можливі технічні застосування [Текст] / Л.П. Козлов // Вісн. АН УРСР. – 1987. - №1. – С.23-33.
5. Povkh I. L. Turbulent heat transfer in dilute surfactant and polymer solutions / I. L. Povkh, A. B. Stupin, P. V. Aslanov et al // Heat Transfer-Soviet Research. – 1978. – Vol. 10, № 1. – P. 98-105.
6. Ступин А.Б. Максимальное снижение турбулентного трения в водных растворах метаупона. / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко // Изв. ВУЗов, Энергетика, -1979. - №11. С 124-126.
7. Повх И.Л. Применение поверхностно-активных веществ, для уменьшения турбулентного трения жидкостей, в технологических аппаратах / И. Л. Повх, А. Б. Ступин, А. П. Симоненко // Аэродинамика в технологических процессах. – М.,Изд. «Наука» 1981. – С. 230-240.
8. Симоненко А.П. Повышение эффективности работы противопожарной техники путем применения гидродинамически-активных полимерных композиций / А.П. Симоненко // Сб. научн. трудов «Проблемы пожарной безопасности» Универс. гражд. защиты Украины, – Харьков: НУГЗУ, – 2012, вып. 32, – С. 195-206.
9. Симоненко А.П. Водорастворимые брикеты на основе высокомолекулярного полиэтиленоксида и перспективы их практического применения в энергосбережении и экологии / А.П. Симоненко // Севастополь: Збірник наукових праць СНУАЕ та П. – Екологічна безпека. – 2012. – Вип. 3 (43). – С. 100-108.
10. Проблемы экологии и техногенно - экологической безопасности [Текст] : Монография / Под общ. ред. д.т.н., проф. Ступина А. Б. - Донецк : ДонНУ, 2010. - 503 с.
11. Симоненко О.П. Перспективи застосування флокового покриття з водорозчинними полімерними наповнювачами в енергозбереженні й екології / О.П.Симоненко. – Львів: Вісник Національного університету «Львівська політехніка», «Хімія, технологія речовин та їх застосування», НУ: ЛП. – №726, 2012. – С.252-257.
12. Ступин А.Б. Гидродинамически-активные композиции в энергосбережении и экологии / А.Б.Ступин, А.П. Симоненко, П.В. Асланов // Донецк: ДонГУ. – 1999. – 228 с.
13. Ступін О.Б. Патент України № 67756 МПК СО8К 5/01 (2006.01) Спосіб приготування лакофарбних матеріалів для отримання водорозчинного покриття на основі поліетиленоксиду / О.Б.Ступін,

- О.П.Симоненко, О.І.Сердюк, С.О.Фоменко. – № u201107618; Заявл. 16.06.2011; Опубл. 12.03.2012, Бюл. №5.
14. Ступін О.Б. Патент України № 67757 МПК С08К 5/01 (2006.01) Склад водорозчинного покриття для зниження гідродинамічного опору / О.Б.Ступін, О.П.Симоненко, О.І.Сердюк, С.О.Фоменко. – № u201107619; Заявл. 16.06.2011; Опубл. 12.03.2012, Бюл. №5.
 15. Ступін О.Б. Патент України № 67758 МПК (2012.01) С05К 5/00 Спосіб приготування швидкорозчинного поліетиленоксиду / О.Б.Ступін, О.П.Симоненко, О.І.Сердюк, О.Ю.Собко. – № u201107620; Заявл. 16.06.2011; Опубл. 12.03.2012, Бюл. №5.
 16. Симоненко О.П. Висококонцентрована суспензія поліетиленоксиду і перспективи її практичного застосування в енергозбереженні й екології / О.П. Симоненко, О.Б. Ступін, П.В. Асланов, О.Ю. Собко // Львів: Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Теорія і практика будівництва», НУ: ЛП. – №742. – 2012. – С.191-197.
 17. Симоненко О.П. Патент України на корисну модель №91060 МПК (2014.01) С08L 71 00 Спосіб приготування висококонцентрованої суспензії поліетиленоксиду /О.П. Симоненко, П.В. Асланов, О.Ю. Собко / Заявл. 22.11.2013 г. – Опубл. 25.06.2014, Бюл.№12.
 18. Ступін О.Б. Гідродинамічно-активні водорозчинні полімерні композиції і перспективи їх застосування в енергозбереженні й екології. / О.Б. Ступін, О.П. Симоненко, П.В. Асланов // Львів : Вісник Національного університету «Львівська політехніка», «Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація», НУ: ЛП. – № 758, -2013, - С. 85-96.
 19. Симоненко А.П. Применение флокового покрытия с водорастворимыми полимерными наполнителями в энергосбережении и экологии / А.П. Симоненко, А.Б. Ступин, А.Ю. Собко, С.А. Фоменко // «Вісник Донбаської нац. академії будівництва і архітектури» Зб. наук. праць, Інженерні системи та техногенна безпека. – Макіївка, ДонНАБА №2012-2(94). – 2012. – С. 15-21.
 20. Симоненко А.П. Гидродинамически-активные композиции на основе полимеров и поверхностно-активных веществ для решения проблем экологической безопасности и энергосбережения: дисс.... д-ра техн. наук 21.06.01 /Симоненко, Александр Петрович. – Донецк. – 2012. – 397 с.
 21. Повх И.Л. А. с. 777338, М. Кл³ F17 D1/02 Добавка для снижения гидродинамического сопротивления теплоносителя / И. Л. Повх, Н. П. Коваленко, А. И. Сердюк, В. Г. Львов, А. А. Заика, А. Б. Ступин, А. П. Симоненко. – № 2672372/25-08; заявл. 20.09.1979; опубл. 07.11.1980, Бюл. № 41.
 22. Повх И.Л. А. с. 798157, М. Кл³ С09 К5/00 // F 25В1/00 Хладоноситель / И. Л. Повх, А. Б. Ступин, А. П. Симоненко, П. В. Асланов, В. М. Добрыченко, С. Н. Максютенко, В. К. Светличный. – № 2728478/23-06; заявл. 19.02.1979; опубл. 23.01.1981, Бюл. № 3.
 23. Симоненко А.П. Перспективы практического применения эффекта Томса в гидравлических системах при чрезвычайных ситуациях / А.П.Симоненко // Збірник науков. праць СНУЯЕ та П. Екологічна безпека, – 2012, вип. 4 (44), Севастополь: СНУЯЕ та П. – С. 232-241.
 24. Ступин А.Б. Гидродинамически-активные полимерные композиции в пожаротушении / А.Б.Ступин, А.П.Симоненко, П.В.Асланов, Н.В.Быковская// Донецк: ДонНУ, 2001. – 198 с.
 25. Симоненко А.П. Повышение эффективности работы мобильных установок аварийной откачки воды добавками гидродинамически-активных полимерных композиций / А.П.Симоненко // Збірник «Вісник НУВІП», м. Рівне. – 2012, Вип. 1 (57), сер. техн. науки. – С. 41-47.
 26. Быковская Н.В. Повышение эффективности работы систем аварийного водоотлива и канализации / Н.В. Быковская, А.Б. Ступин, А.П. Симоненко // Вісн. Донец. ун-ту. Сер. А: Природничі науки. – 2004. – Вип. 1, ч. 1. – С. 475-480.
 27. Ступин А.Б. Повышение эффективности работы систем пожаротушения, канализации и аварийной откачки сточных вод / А. Б. Ступин, А. П. Симоненко, Н. В. Быковская, П. В. Асланов // Проблемы экологии и техногенно-экологической безопасности. – Донецк, 2010. – Разд. 5. – С. 140-200.
 28. Симоненко А.П. Перспективы практического применения гидродинамически-активных добавок в гидравлических системах при чрезвычайных ситуациях /А.П. Симоненко, П.В. Асланов, Н.А. Дмитренко // Экология и защита окружающей среды : сб. тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., 19-20 марта 2014 г. / Под ред. Грицук А. Е.. — Минск : Изд. центр БГУ, 2014, – ISBN 978-985-553-182-2, – С. 309-313.
 29. Симоненко А.П. Применение эффекта Томса для уменьшения гидравлических потерь в канализационных коллекторах и системах водоотведения при чрезвычайных ситуациях /А.П. Симоненко, П.В. Асланов, Н.А. Дмитренко // Экология и защита окружающей среды: Сб. тез. докл. II Меж-дунар. науч.-практ. конф., Минск, 25 марта 2015 г. / редкол. : С. Н. Петруша [и др.]; под общ. ред. А. Е. Грицука. – Минск: БГУ, 2015, ISBN 978-985-553-290-4, – С.137-140.

30. Ступін О.Б. Патент України на корисну модель №87823 МПК F16L 55/04 (2006/01) Склад для зниження пульсацій тиску і вібрацій гідравлічних систем /О.Б. Ступін, О.П. Симоненко, П.В. Асланов, П.К. Костенко / Заявл. 12.07.2013 г. – Опубл. 25.02.2014, Бюл.№4.
31. Ступин А.Б. Улучшение виброакустических характеристик гидравлических систем путем применения гидродинамически-активных добавок / А.Б. Ступин, П.В. Асланов, А.П. Симоненко, В.О. Самуйлов, П.К. Костенко // Труды первого международного научно-практического семинара «Повховские научные чтения». – Донецк: ДонНУ, 2010, ISBN 978-966-639-449-4 – С. 37-43.
32. Пилипенко В.Н. Влияние добавок на пристенные турбулентные течения [Текст] / В.Н. Пилипенко //Итоги науки и техн.ВИНИТИ.Мех.жидкости и газа.-1980.-Т.15.-С.156-257.
33. Повх И.Л. Особенности турбулентных течений растворов мицеллообразующих поверхностно-активных веществ / И.Л. Повх, А.Б. Ступин, С.Н. Максютенко, П.В. Асланов, А.П. Симоненко // В сб.: Механика турбулентных потоков. – М., Изд. «Наука» 1980. – С.44-69.
34. Stupin A.V. Application of Hydrodynamically-Active Polymeric Dopants and Surfactants to Energy Saving Technologies / A.V.Stupin, P.V.Aslanov, N.V.Bykovskaya, S.A.Fomenko, A.P.Simonenko // International Journal of Fluid Mechanics Research. – 2004. – Vol.31, No. 1. – P. 74-86.
35. Ступин А.Б. Повышение эффективности работы гидроструйного оборудования путем применения гидродинамически-активных добавок / А. Б. Ступин, П. В. Асланов, А. П. Симоненко и др. // Пути развития горноспасательного дела: тр. науч.-практ. конф.: (г. Донецк, 21-23 окт. 1997 г.). – Донецк, 1997. – С. 6-9.
36. Ступин А.Б. Повышение эффективности гидроструйной резки конструкционных материалов / А. Б. Ступин, П. В. Асланов, С. А. Фоменко и др. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр. – Донецк, 1998. – Вып. 6, т. 3. – С. 145-148.
37. Ступин А.Б. Роботизированная технология гидроструйной резки конструкционных материалов в техногенно-опасных условиях / А. Б. Ступин, П. В. Асланов, С. А. Фоменко и др. // Вісн. Донец. ун-ту. Сер. А: Природничі науки. – 2002. – № 2. – С. 366-370.
38. Симоненко А.П. Оценка риска при загрязнении атмосферного воздуха на свиноводческом комплексе /А.П. Симоненко, А.Ю. Собко//Труды первого международного научно-практического семинара «Повховские научные чтения». – Донецк: ДонНУ, 2010, ISBN 978-966-639-449-4 – С. 153-156.
39. Ступін О.Б. Патент України № 67759 МПК (2012.01) A01C 3/00 Композиція для обробки гною / О.Б. Ступін, О.П. Симоненко, О.Ю. Собко. – № u201107621; Заявл. 16.06.2011; Опубл. 122.03.2012, Бюл. №5.
40. Симоненко А.П. Применение водорастворимых полимерных композиций для уменьшения выделения вредных газов в помещениях животноводческих комплексов /А.П. Симоненко, А.Ю. Собко, С.А. Фоменко // В 3б. доповідей нац. екологічного форуму «Екологія промислового регіону», том. 1 – Донецьк: Державне підпр. «Донецький екологічний інститут», 2012. – С.168-170.
41. Симоненко А.П.. Эффективный способ очистки отработанных дизельных масел M14B₂ [Текст] /А.П. Симоненко, Н.Б.Узденников// Вісн. держ. академ. будівництва і архітектури. Інженерні системи та техногенна безпека у будівництві.№2(27).Макіївка:ДонДАБА.-2001.-С.52-54.
42. Симоненко О.П. Декларацийний патент № 34719А на винахід, Україна, С 10М 175/02, Спосіб очищення відпрацьованого моторного мастила від суспендованих механічних домішок та води / О.П.Симоненко, М.Б.Узденніков, В.П.Симоненко / заявник і патентовласник – Донецький Національний Університет. – № 99063090; Заявл. 04.06.1999, опубл. 15.03.2001. Бюл. № 2.
43. Симоненко О.П. Патент № 39145 на винахід, Україна, С 10М 175/00, 175/02 – Спосіб регенерації відпрацьованого моторного мастила / О.П Симоненко, М.Б Узденніков. / заявник і патентовласник – Донецький Національний Університет.–№ 97062989. Заявл. 23.06.1997, опубл. 15.06.2001. Бюл. № 5.

Поступила в редакцію 22.01.2018 г.

SOLVING THE PROBLEMS OF ECOLOGY AND TECHNOGENIC-ECOLOGICAL SAFETY BY APPLICATION OF HYDRODYNAMICALLY-ACTIVE COMPOSITIONS

A.P. Simonenko, P.V. Aslanov, A.Y. Sobko, S.A. Fomenko

The energy crisis, the sharp deterioration of the ecological state of the environment, the insufficient effectiveness of the means of preventing and eliminating the consequences of natural disasters (mass fires, earthquakes, floods, etc.) and man-made accidents in recent decades have become one of the most important problems for virtually all countries of our planet. Low efficiency, from ecological and energy-saving points of

view, technologies and technical means that are used on an industrial scale, as well as to solve technogenic and environmental problems, can threaten national security even for developed countries of the world.

In the article presented, it is shown that the creation and use of hydrodynamically active compositions based on water-soluble high molecular weight polymers (VP) and micelle-forming surfactants (IPAW) allows solving a number of problems of energy conservation, ecology and man-caused environmental safety in fire extinguishing, emergency pumping of sewage, solution of environmental problems of large livestock complexes, etc.

Keywords: hydrodynamically active compositions, polyethylene oxide, polyacrylamide, micelle-forming surface-active substances, ecological safety, energy saving.

Симоненко Александр Петрович, доктор технических наук; ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», 83055, г. Донецк, ул. Университетская 24,
E-mail: sap2012@rambler.ru.
Тел. для контактов+38-050-667-34-61

Simonenko Aleksandr, Doctor of Technical Sciences, Donetsk National University, Donetsk

Асланов Петр Васильевич, кандидат физико-математических наук; ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», 83055, г. Донецк, ул. Университетская 24,
E-mail: aslanov.fnpme@gmail.com
Тел. для контактов+38-050-954-62-57

Aslanov Petr, Candidate of physico-mathematical sciences; Donetsk National University, Donetsk

Собко Александр Юрьевич, старший преподаватель; ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», 83055, г. Донецк, ул. Университетская 24,
E-mail: sobko63@gmail.com
Тел. для контактов+38-099-348-54-98

Sobko Aleksandr, Senior Lecturer, Donetsk National University, Donetsk

Фоменко Сергей Александрович, старший преподаватель; ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», 83055, г. Донецк, ул. Университетская 24,
E-mail: fomenko70@gmail.com
Тел. для контактов+38-095-568-16-02

Fomenko Sergei, Senior Lecturer, Donetsk National University, Donetsk

УДК 54.058

ОЧИСТКА ПРОМЫВОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ОТ СОЕДИНЕНИЙ СВИНЦА

© 2018 М.М. Ялалова, А.И. Сердюк, С.А. Солдатов

Рассмотрены методы очистки сточных вод гальванического производства от соединений свинца. Приведены результаты исследований по очистке сточных вод от ионов свинца электрохимическим способом. Установлено, что использование шарообразных свинцовых катодов позволяет интенсифицировать процесс, что способствует увеличению степени очистки сточных вод от ионов свинца (II).

Ключевые слова: сточные воды; ионы свинца (ii); гальваническое производство; электролиз; шарообразные электроды.

Гальванотехника – одно из производств, серьезно влияющих на загрязнение окружающей среды, в частности ионами тяжелых металлов, наиболее опасных для биосферы. Главным поставщиком токсикантов в гальванике (в то же время и основным потребителем воды и главным источником сточных вод) являются промывные воды. Объем сточных вод очень велик из-за несовершенного способа промывки деталей, который требует большого расхода воды (2 м³ и более на 1 м² поверхности деталей) [1].

Стоки, содержащие кислотно-щелочные примеси составляют 80-90% от общего количества сточных вод гальванического производства.

Как при производстве аккумуляторов, так и при процессах свинцевания и рафинирования черного свинца образуется большое количество свинца в промывочных водах.

Очистка сточных вод от ионов свинца в настоящее время является актуальной проблемой глобального масштаба. Об опасности и вредности соединений свинца говорит то, что они включаются через цепь питания в круговорот и концентрируются в живых организмах.

Целью работы является анализ методов очистки сточных вод гальванического производства от соединений свинца, как наиболее токсичного компонента электролита и очистка от соединений свинца.

В настоящее время имеется достаточно широкий ассортимент методов, таких как химические, биохимические, электрохимические, сорбционные, адсорбционные, ионообменные, позволяющие перерабатывать сточные воды гальванопроизводства с получением пригодного для дальнейшего использования продукта и оборотной воды.

Основной задачей очистки от свинца сточных вод является применение наиболее энергосберегающих методов, а также возвращение извлеченных из сточных вод металлов обратно в производство.

Наиболее распространенным методом очистки воды от свинца является сорбция. В качестве сорбента используют активированный уголь, оксихинолин, различные модифицированные сорбенты [2,3]. Однако в последнее время, из-за ужесточения требований к качеству питьевой воды, его начали вытеснять углеродные нанотрубки (УНТ), обладающие уникальными сорбционными характеристиками, что связано, в первую очередь, с рекордно высокой удельной поверхностью, присущей этим структурам. Стоит отметить, что новые сорбенты мало распространены и имеют довольно высокую стоимость. Слабым местом этих методов является процесс регенерации отработанных сорбентов.

Для очистки сточных вод от соединений свинца авторами патента [4] предложена технология, базирующаяся на использовании серосодержащего полимерного сорбента. Предлагаемый сорбент получен из полисульфида натрия и отходов производства эпихлоргидрина. Особенностью нового сорбента является наличие в полимерной цепи гидроксильных групп, по которым происходит координация ионов свинца. Комплексное исследование сорбции свинца из модельных растворов позволило определить термодинамические и кинетические параметры процесса, а также условия его проведения.

Известен также способ микробиологической очистки от ионов свинца, при котором используют бактериальную смесь микроорганизмов, состоящую из штаммов *Rhodococcus ruber* (ИЭГМ АС 219; ИЭГМ АС 220; ИЭГМ АС 221; ИЭГМ АС 222; ИЭГМ АС 338; ИЭГМ АС 347). Отличительным свойством предлагаемых штаммов родококков является их высокая активность к аккумуляции Zn, Cd, Pb, а также способность развиваться на широком спектре углеводов [5]. Недостатком данного способа является низкая доступность этих микроорганизмов.

Описан способ очистки сточных вод от ионов свинца, включающий введение реагента, осаждение и отделение осадка. Данный способ отличается тем, что с целью повышения степени очистки, сокращения расхода реагентов и упрощения процесса, осаждение ведут 50-120-кратным избытком водорастворимой соли кальция и углекислой соли аммония взятых в равном отношении, при pH 8,8-10,5 [6].

Также очистку сточных вод от ионов свинца осуществляют обработкой их известью, калиевыми солями жирных кислот с последующим отделением образовавшихся малорастворимых соединений [7].

Одним из методов извлечения малорастворимых соединений свинца из водных растворов является электрофлотация. Как показали исследования [8] степень извлечения гидроксида свинца не превышает 5 %. Это объясняется высокой дисперсностью частиц соединений свинца и высоким положительным значением электрокинетического потенциала поверхности данных частиц в диапазоне pH 6–12. Повышение степени электрофлотационного извлечения индивидуальных малорастворимых соединений свинца достигается только в присутствии солей Al, Zn и Fe (III) и при pH среды, при которой данные металлы образуют дисперсную фазу гидроксидов металлов. Так, в присутствии соли алюминия при pH 6 степень извлечения зависит от исходной концентрации ионов свинца и находится в интервале от 59 до 76%. Извлечение в данном случае обуславливается сорбцией ионов свинца на гидроксиде алюминия. Извлечение ионов свинца в присутствии солей цинка эффективно происходит при полуторном избытке концентрации ионов цинка по отношению к ионам свинца. Степень извлечения ионов свинца в присутствии соли цинка практически не зависит от природы труднорастворимого соединения свинца, и составляет 92–98 %. Это объясняется близким значением pH образования гидроксидов свинца и цинка (pH 9,5–10). Тогда как при использовании солей алюминия и железа pH гидроксидообразования, отличающиеся на 4 единицы, то природа соединений свинца существенно влияет на эффективность его очистки.

Предложено [8] для практических целей проводить электрофлотационное извлечение соединений свинца в присутствии соли цинка при pH 9,5 и соотношении и свинца к иону введенного металла 1:(0,5 – 2,5) при общем содержании металлов в воде не более 0,3 г/л. Несмотря на то, что этот способ позволяет извлекать малорастворимые соединения свинца, присутствует существенный недостаток: требуется дополнительное введение соли металлов. Также не решена проблема извлечения гидроксида свинца. Степень его извлечения остается по-прежнему на нулевом уровне.

В машиностроительной, химической и других отраслях промышленности, где требуется очистка сточных вод от соединений свинца, используют осаждение

малорастворимых соединений путём дозированного добавления к сточным водам растворов, содержащих соединения шестивалентного хрома. На Юргинском машиностроительном заводе имеются отработанные концентрированные хромовые электролиты гальванического производства, содержащие соединения Cr^{+3} и Cr^{+6} , которые могут быть использованы для осаждения малорастворимых соединений свинца из сточных вод [9].

Существует изобретение [10], которое относится к способам очистки сточных вод от ионов свинца и может быть использовано на предприятиях электротехнической промышленности, имеющих производства свинцовых аккумуляторов, печатных плат и гальванические цеха. В сточную воду, содержащую ионы свинца, имеющую рН гидратообразования, вводят смесь хлористой соли Fe(II) и серноокислой соли Fe(III) при их массовом соотношении к свинцу 1:(0,9-1,1), при этом массовое соотношение ионов $\text{Fe(II)}:\text{Fe(III)}$ в смеси составляет (0,4-0,6):(0,6-0,4), с последующим электрофлотационным извлечением из воды образовавшихся взвешенных частиц ферритов металлов при плотности тока 7,5-8,0 mA/cm^2 и времени очистки 4-5 минут. Способ позволяет повысить степень очистки и скорость процесса очистки от ионов свинца, сократить продолжительность процесса, а также снизить удельные энергозатраты. Анализируя выше приведенные методы очистки от свинца [2-10] следует отметить, что в очищаемую сточную воду вводятся дополнительные реагенты, которые в свою очередь ее загрязняют.

Очистка воды от свинца также может проводиться по мембранному методу. Он заключается в использовании специального оборудования с перегородками-мембранами. После очистки воды концентрация свинца и других металлов, зачастую, не превышает 1 mg/l [11]. Предельно допустимая концентрация свинца в водоемах коммунально-бытового водопользования составляет 0.01 mg/l . Свинец скапливается по другую сторону от мембраны в виде гелеподобной массы. Такой способ очистки воды от свинца и других металлов является наиболее эффективным и многообещающим. Высокая степень очистки воды обусловлена тем, что, во-первых, мембраны высокоселективны, то есть способны разделять вещества, а полупроницаемая перегородка может пропускать только воду без примесей, которые концентрируются по другую её сторону. Во-вторых, такие перегородки изготовлены из специального материала, который отличается высокой прочностью и стойкостью к химическим факторам обрабатываемой воды. И последнее, мембрана полностью выполняет свои функции длительное время, не теряет свои качества на протяжении всего эксплуатационного срока, при этом имеет высокую производительность в очистке воды от свинца. Недостатком данного метода является дороговизна мембран.

Электрохимические методы [12] характеризуются достаточной простотой технологической схемы, при очистке не используются химические реагенты, которые загрязняют промывочную воду. В системах очистки и подготовки воды процессы с применением электрического тока используются в тех случаях, когда другими методами не удается достичь высокой эффективности очистки, или при необходимости обеспечить экологическую безопасность.

Для решения этих проблем авторами статьи [12] рассмотрена возможность применения кусковых электродов, составленных из металлических кусков свинца, имеющих большую развитую поверхность. Использование таких электродов примечательно тем, что затраты минимальные, процессы практически безреагентные.

Нами же предложен аналогичный метод с применением шарообразных электродов. Этот метод, являясь безреагентным, имеет возможность стать перспективным направлением в создании новых безотходных и эффективных технологий очистки сточных вод, а использование электродов с шарообразной

поверхностью позволяет упрощать процесс, что способствует увеличению степени очистки сточных вод от ионов свинца (II).

Исследование проводилось в проточном режиме в электрохимической ячейке. Для ведения электролиза в проточном режиме на дне электролизёра располагается токопроводящая графитовая пластина с мелкими отверстиями. В качестве катода использовали шарообразные электроды, которые насыпаются на пластину. Анодом служил графитовый стержень, располагающийся в верхней части электролизера. Сточная вода, содержащая ионы свинца, пропускается с определенной скоростью через слой шарообразного электрода. Содержание ионов тяжелых металлов в анализируемом растворе до и после опытов определяли инверсионно – вольтамперометрическим методом.

Исследовано влияние плотности тока и диаметра частиц сферической формы на степень извлечения свинца.

Исследования основывались на очистке отработанных растворов от ионов свинца, путем их электролитического восстановления на катоде до элементарного состояния.

Исследования влияния плотности тока на степень очистки раствора от ионов свинца (II) проводились в пределах плотности тока от 100 А /м² до 600 А/м².

При увеличении плотности тока, степень извлечения свинца при 250 А/м² достигает 69 %, дальнейшее увеличение плотности тока приводит к снижению степени извлечения металла до 35 %.

Максимальная степень извлечения металла достигается, когда весь объем электрода работает в режиме предельного диффузионного тока. Снижение степени извлечения свинца (II) с увеличением плотности тока можно объяснить усилением конкурентного процесса – выделения водорода. При увеличении толщины слоя шарообразных частиц свинца до 1,9 см, степень извлечения свинца достигает 68 %. При уменьшении толщины слоя 0,9 см, она понижается.

В объеме шарообразных электродов большой высоты при наложении катодного потенциала могут возникать зоны анодной поляризации, это объясняется образованием сгустка частиц, приобретающих функции биополярного электрода. Также могут возникнуть зоны максимальной поляризации и электроактивные зоны. При отсутствии электродов степень извлечения свинца не превышает 15%.

Таким образом, результаты исследований, проведенных по очистке сточных вод от ионов свинца с использованием шарообразных электродов, показали возможность применения, указанного безреагентного электрохимического способа для очистки сточных вод. Наилучший показатель степени очистки раствора от ионов свинца (II) был получен при диаметре шарообразных частиц свинца равном 0,6 см и при плотности тока 250 А /м².

Можно считать, что наиболее перспективным является электрохимический метод выделения свинца на катодах из свинца шарообразной формы, который может найти более широкое применение в различных отраслях промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградов С.С. Экологически безопасное гальваническое производство / Под. ред. В.Н.Кудрявцева. М.: Глобус, 2002. – 352 с.
2. Долина Л. Ф. Сорбционные методы очистки производственных сточных вод: Учебное пособие. – Д.: ДИИТ, 2000. – 84 с.
3. Очистка сточных вод от ионов свинца на модифицированных базальтовых сорбентах [Текст] / Е.В. Кондратов, И. А. Лебедев, Л. Ф. Комарова // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2, Ч. 1. – С. 375-380.
4. Пат. 2475299 Российская Федерация, МПК⁵¹ В 01 J 20/02, В 01 J 20/26, В 01 J 20/30. Способ получения серосодержащих сорбентов для очистки сточных вод от тяжелых металлов / Рединова А. В., Игнатова О.Н., Грабельных В. А., Леванова Е. П., Руссавская Н. В., Терек С. В., Корчевин Н. А.;

- патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Иркутский государственный университет путей сообщения, Учреждение Российской академии наук Иркутский институт химии им. А.Е. Фаворского Сибирского отделения РАН. – №2010153438/05; заявл. 27.12.2010; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5. – 7 с.
5. Влияние тяжелых металлов на процессы биохимического окисления органических веществ: теория и практика / Л. О. Никифорова, Л. М. Белопольский. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. — 78 с.
 6. George Tchobanoglous, Franklin L.Burton, Н. David Stensel Wastewater Engineering. Treatment and Reuse. – New York.: McGraw-Hill Higher Education, 2003. – 1819 p.
 7. Lead: Its Effects on Environment and Health. Ed. by Sigel, Astrid / Sigel, Helmut / Sigel, Roland K.O. Series: Metal Ions in Life Sciences 17, de Gruyter, Boston, 2017. – 556 p.
 8. Повышение эффективности очистки сточных вод от соединений свинца с применением электрофлотации / В.И. Ильин, В.А. Колесников, А.В.Перфильева // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 11. – С. 45-47.
 9. Торосян В.Ф., Торосян Е.С., Бельских Т.Б. Очистка сточных вод от соединений свинца дозированным добавлением растворов с соединениями шестивалентного хрома. Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». – 2014. – №4 (56). Режим доступа <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-4/30-04-14.ttb.pdf>
 10. Пат. 2426695 Российская Федерация, МПК⁵¹ С 02 F 1/465, С 02 F 101/20. Способ очистки сточных вод от ионов свинца / В.И.Ильин, В.А.Колесников, А.В.Перфильева; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Российский химико – технологический университет им. Д.И. Менделеева". – № 2009125321/05; заявл. 02.07.2009; опубл. 20.08.2011, Бюл. № 23. – 6 с.
 11. Яковлев С.В. Водоотведение и очистка сточных вод / Учебник для вузов / С.В.Яковлев, Ю.В.Воронов – М.: АСВ, 2004. – 704 с.
 12. Нурдиллаева, Р.Н. Разработка электрохимического метода очистки сточных вод / Р.Н. Нурдиллаева, А.Н. Жылысбаева, А.Б. Баешов // Геология, География и Глобальная энергия. – 2010. – №2(37). – С.75-78.

Поступила в редакцию 13.02.2018 г.

CLEANING OF WASHING WATERS OF GALVANIC PRODUCTION FROM LEAD CONNECTIONS

M.M. Yalalova, A.I. Serdyuk, S.A. Soldatov

Methods for the purification of wastewater from electroplating lead compounds. The results of studies on wastewater treatment from lead ions by electrochemical methods are presented. It is established that the use of spherical lead cathodes makes it possible to intensify the process, which contributes to an increase in the purification of waste water from lead (II) ions.

Key words: waste water; ion of lead (ii); galvanic production; electrolysis; ball-shaped electrodes.

Ялалова Маргарита Маратовна, ассистент кафедры “Техносферная безопасность”, ГОУ ВПО “Донбасская национальная академия строительства и архитектуры”, ДНР, Макеевка, yalalova-rita@mail.ru,
Контактный телефон: +(38) 0663142799

Yalalova Margarita Maratovna, assistant of the department "Technospheric security", State educational institution of higher professional education "Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture", Makeyevka.

Сердюк Александр Иванович, д.х.н., профессор, профессор кафедры “Техносферная безопасность”, ГОУ ВПО “Донбасская национальная академия строительства и архитектуры”, ДНР, Макеевка, ecoalserdiuk@rambler.ru

Serdyuk Alexander Ivanovich, doctor of chemical sciences, professor, professor of the department "Technospheric security", State educational institution of higher professional education "Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture", Makeyevka

Солдатов Сергей Алексеевич, студент 4 курса, кафедра “Техносферная безопасность”, ГОУ ВПО “Донбасская национальная академия строительства и архитектуры”, ДНР, Макеевка, petrukhin.vasya@list.ru

Soldatov Sergey Alekseevich, 4th year student, department of "Technospheric security", State educational institution of higher professional education "Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture", Makeyevka

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Для публикации в журнале «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимаются ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные работы, содержащие новые результаты теоретических и экспериментальных исследований в области технических наук. Авторы научных статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за сам факт их публикации. Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала после рецензирования, учитывая научную значимость и актуальность представленных материалов. Если рецензия положительна, но содержит замечания и пожелания, редакция направляет статьи авторам на доработку вместе с замечаниями рецензента. Автор должен ответить рецензенту по всем пунктам рецензии. После такой доработки редколлегия принимает решение о публикации статьи. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензии или выдержки из них, либо аргументированное письмо редактора. Редколлегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения. В случае отказа в публикации статей редколлегия не возвращает автору рукопись статьи. Статья, задержанная на срок более трех месяцев или требующая повторной переработки, рассматривается как вновь поступившая. Гонорар авторам не выплачивается и плата за публикацию статей не взимается.

2. Рукопись предоставляется в одном экземпляре (на русском или английском языках), напечатанном с одной стороны листа бумаги формата А4 (экземпляр подписывается авторами). Страницы рукописи должны быть последовательно пронумерованы. Объем рукописи, как правило, от 5 до 15 страниц (для обзорной статьи – до 25), включая рисунки, таблицы, список литературы, сведения об авторах. Вместе с рукописью на адрес электронной почты vestnik.donnu.g@donnu.ru высылается электронный вариант с полным текстом статьи в формате doc или docx. При отсутствии возможности предоставления в редколлегию рукописи, на электронную почту редакции высылается полный текст статьи в формате pdf. Рукописи, не соответствующие редакционным требованиям, и статьи, не соответствующие тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Редакция оставляет за собой право проводить редакционную правку рукописей. Корректур статей авторам не высылается.

3. Обязательные требования к оформлению статей:

- **Размер бумаги:** А4.
- **Ориентация:** книжная.
- **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
- **Междустрочный интервал:** одинарный.
- **Абзацный отступ:** 1 см.
- **Основной текст статьи:** шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
- **Аннотация, таблицы, подрисуночные подписи, список литературы, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.

4. Текст статьи должен соответствовать следующей структурной схеме:

- **Первая строка:** индекс УДК – выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через строку:** **НАЗВАНИЕ** статьи – полужирный, выравнивание по центру, прописными буквами, без переноса слов, без абзацного отступа.
- **Через строку:** копирайт © и год – полужирный, выравнивание по левому краю, без точки после года, через 3 пробела *инициалы и фамилия(и) автора(ов)* – полужирный, курсив, выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через две строки:** аннотация объемом до 100 слов, кратко отражающая предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами.
- **На следующей строке:** словосочетание *Ключевые слова:* – полужирный, курсив. Далее приводятся ключевые слова количеством до 10 слов, отделяемых друг от друга запятой либо точкой с запятой. Аннотацию и ключевые слова рекомендуется отделять с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание, например, постановка задачи, методы ее решения, анализ полученных результатов. В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ** – полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее со следующей строки приводится нумерованный перечень используемых литературных источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание» и ГОСТ 7.05-2008 «Библиографическая ссылка». Ссылка на источник приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо включение в список литературы источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** надпись *Поступила в редакцию xx.xx.20xx г.* размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, *инициалы и фамилия(и) автора(ов)*, аннотация, *ключевые слова* на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языке) указываются сведения об авторах:
 - **Фамилия, имя, отчество;**
 - ученая степень и звание, должность, с указанием организации (полное название, в именительном падеже), которую представляет автор;
 - страна, город;
 - адрес электронной почты.

5. Образец оформления статьи:

УДК 537.86

ФУНКЦИИ СЛОЖНОСТИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ УЧАСТКОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ

© 2017 *И.А. Третьяков, В.В. Данилов*

В настоящей работе описан этап идентификации участков, которые содержат информацию на кривой, рассмотрена методика сегментации для обработки экспериментальных кривых, предложены несколько видов функции сложности.

Ключевые слова: функция сложности; сегментация; экспериментальные кривые; лингвистический подход.

Введение. При проведении исследований различных физических явлений...

Постановка задачи. Экспериментальные кривые – один из способов представления результатов...

Этап сегментации. Сегментация экспериментальных кривых или...

Выводы. В данной работе рассмотрена методика ...

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осадчая И.А. Методы исследования структуры многомерных экспериментальных данных / И.А. Осадчая, О.Г. Берестнева // Научное обозрение. Технические науки. – 2014. – № 2. – С. 91-92.
2. Пестунов И.А. Алгоритмы кластеризации в задачах сегментации спутниковых изображений / И.А. Пестунов, Ю.Н. Синявский // Вестник КемГУ. – 2012. – №2. – С. 110-125.

Поступила в редакцию xx.xx.20xx г.

FUNCTIONS OF COMPLEXITY FOR ALLOCATION AND RECOGNITION OF CHARACTERISTIC SITES OF EXPERIMENTAL CURVES

Tretiakov I., Danilov V.

In the paper the stage of identification of sites which contain information on a curve is described, the segmentation technique for processing of experimental curves is considered, several types of function of complexity are offered.

Keywords: complexity function; segmentation; experimental curves; linguistic approach.

Третьяков Игорь Александрович

ассистент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: es75i@mail.ru

Tretiakov Igor

Assistant Lecturer at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Vice-Rector of Research and Innovation Activity Donetsk National University, DPR, Donetsk.

6. Рисунки и таблицы располагаются по тексту строго в пределах печатного поля книжной ориентации страниц после их первого упоминания в тексте статьи. Вся текстовая информация на рисунках должна быть четкой и разборчивой и не иметь лишних деталей. Необходимо следить за тем, чтобы после возможного уменьшения до размера 80 мм высота букв и цифр на рисунке оставалась не менее 2 мм. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись (не совмещенную с рисунком) в формате: Рис. №. Название. Каждая таблица должна иметь заглавие (выравнивание – по центру) в формате: Таблица №. Название. Во избежание смещений рисунков рекомендуется размещать их в таблицах с двумя строками с параметром «Нет границ» (в первой строке размещается рисунок, во второй - подрисуночная подпись). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами. Сканированные рисунки не принимаются. Образец оформления рисунка и таблицы:

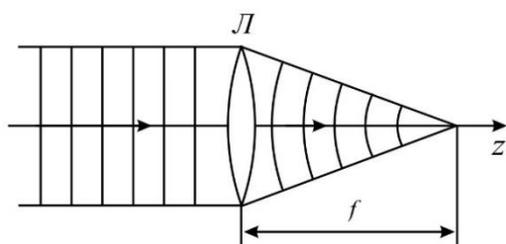


Рис. 4. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F₃

Элемент	Номинал	Единица измерения
C _{out}	25	пФ
C ₁	10	нФ
C ₂	100	мкФ
L ₁	150	мкГн
L ₂	460	нГн
L ₃	765	нГн
R ₁	39	кОм

7. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». Нумеровать следует только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на формулы приводятся в круглых скобках. Каждая формула отделяется от основного текста интервалом в 6 пт. перед и после. Все числовые значения физических величин выражаются в системе СИ. В десятичных дробях целая часть должна отделяться от дробной запятой, а не точкой. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются только с помощью редактора формул Microsoft Equation 3.0 или MathType 5.0–6.0 с параметрами:

- **текст и переменная:** курсив;
- **матрица и вектор:** полужирный курсив;
- **размер:** обычный 12 пт., крупный индекс 9 пт., мелкий индекс 7 пт., крупный символ 18 пт., мелкий символ 12 пт.

Образец оформления формулы:

$$y_t = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i y_{t-i} + b \xi_t \quad (1)$$

8. Материалы предоставляются по адресу:

ДНР, 283001, г. Донецк, пр. Театральный, 13, Физико-технический факультет.

Главный редактор: Белоусов Вячеслав Владимирович, каб. 252.

Зам. главного редактора: Данилов Владимир Васильевич, каб. 203.

Ответственный секретарь: Третьяков Игорь Александрович, каб. 210.

Контактные тел.: +38 (062) 302 07 81, +38 (062) 302 92 88

E-mail: vestnik.donnu.g@donnu.ru

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия Г: Технические науки**

2018. – № 1

Технические редакторы: В.Г. Медведева, И.А. Третьяков

Адрес редакции:

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ул. Университетская, 24,
283001, г. Донецк

Тел.: +38 (062) 302 07 81, +38 (062) 302 92 88

E-mail: vestnik.donnu.g@donnu.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

Подписано в печать 03.09.2018 г.

Формат 60×84/8. Бумага офсетная.

Печать – цифровая. Усл. печ. л. 12,01

Тираж 100 экз. Заказ. №

Издательство ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»
283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24.

Тел.: +38 (062) 302 92 27.

Свидетельство о внесении субъекта издательской деятельности
в Государственный реестр
серия ДК № 1854 от 24.06.2004 г.