

ISSN 2663-4228 (Print)
ISSN 2663-4236 (Online)

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ

*Основан
в 1997 году*

**Серия Г
Технические
науки**

1/2020

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, доц. **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** (Национальный исследовательский университет «МЭИ», 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 **Т.В. Ермоленко**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Завадская**; д-р техн. наук, проф. **С.А. Зори**; д-р техн. наук, проф. **М.Н. Чепцов**; канд. техн. наук **Т.В. Шарий**; канд. техн. наук, доц. **С.В. Гридин**; д-р техн. наук, проф. **Ф.В. Недопекин**; д-р техн. наук, проф. **С.М. Сафьянц**; д-р физ.-мат. наук, д-р техн. наук, проф. **В.К. Толстых**; д-р техн. наук, проф. **Г.В. Аверин** (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Российская Федерация); д-р техн. наук, проф. **С.В. Борщевский**; д-р техн. наук, проф. **Е.В. Горохов**; председатель Госкомэкополитики при Главе ДНР **Р.В. Кишкань**; д-р хим. наук, проф. **А.И. Сердюк**; д-р техн. наук, ст. науч. сотр. **А.П. Симоненко**; д-р архитектуры, доц. **Н.В. Шолух**.

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**.

Assistant Editor – **I.A. Tretiakov**.

The Members of the Editorial Board: Dr. of tech., docent **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** (National Research University "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. **T.V. Ermolenko**; Cand. of tech., docent **T.V. Zavadskaja**; Dr. of tech., prof. **S.A. Zori**; Dr. of tech., prof. **M.N. Cheptsov**; Cand. of tech. **T.V. Sharii**; Cand. of tech., docent **S.V. Gridin**; Dr. of tech., prof. **F.V. Nedopekin**; Dr. of tech., prof. **S.M. Safyants**; Dr. of phys. and math., Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh**; Dr. of tech., prof. **G.V. Averin** (Belgorod State National Research University, Russian Federation); Dr. of tech., prof. **S.V. Borshchevskiy**; Dr. of tech., prof. **E.V. Gorokhov**; 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., senior researcher **A.P. Simonenko**; Dr. of arch., docent **N.V. Sholukh**.

Адрес редакции: ГОУ ВПО «ДонНУ», ДНР 83001, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24

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

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

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

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**Перечень ВАК**) (Приказ МОН ДНР №440 от 06.03.2020 г.) по следующим группам научных специальностей: **05.11.00** – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; **05.12.00** – Радиотехника и связь; **05.13.00** – Информатика, вычислительная техника и управление.

Журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему **РИНЦ** (Лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г. в ред. от 27.03.2019 г.): <http://elibrary.ru/titles.asp?sortorder=0&titlename=2663-4228>

Журнал включен в международную индексационную наукометрическую базу **Index Copernicus International Journals Master List**: <http://journals.indexcopernicus.com/search/details?id=63327>

*Печатается по решению Ученого совета ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»
Протокол №5 от 29.05.2020 г.*

Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Номер посвящён 55-летию со дня
основания Физико-технического
факультета

Серия Г: Технические науки

№ 1

Донецк 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Вступительное слово 3

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Пометун Е.Д., Хрипунов Р.А., Васильева А.В. Разработка автоматизированной системы научных исследований для аэродинамического эксперимента 4

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Бабичева М.В., Попов А.С., Яновский А.В. Автоматизация средств обнаружения радиоканалов утечки информации 9

Курушин А.А. Электродинамический расчет излучающего транзисторного СВЧ усилителя 14

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Бабичева М.В., Василенко Д.В. Атаки на автоматизированные системы аутентификации на нейросетевых классификаторах 23

Рушечников Я.И., Данилов В.В. Информационная технология радиомониторинга на основе программно-определяемой радиосистемы 31

Шарий Т.В. Анализ информативности участков звуковых сигналов для распознавания речи в условиях шума 37

Данилов В.В., Тимошенко Н.А., Третьяков И.А. Основа элементной базы оптических информационных технологий 46

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Кухарев А.Л. Выбор рациональных энергетических параметров многоэлектродных электропечных установок 59

Захаров Н.И., Бирюков А.Б., Тупилко И.В., Шатович В.А. Численное исследование процессов тепломассопереноса при внепечной дегазации жидкого металла продувкой инертным газом и энергоресурсосберегающий режим технологии 72

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Нездойминов В.И., Голоденко Н.Н., Заворотный Д.В., Майстренко О.В. Математическое описание гидродинамических параметров эрлифтного биореактора-осветлителя 84

Нам 55 97

Правила для авторов 104

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997

Number dedicated to the 55th
anniversary of the founding of the
Faculty of Physics and Technology

Series G: Technical science

No 1

Donetsk 2020

CONTENTS

Opening remark 3

INSTRUMENT ENGINEERING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Pometun E.D., Khripunov R.A., Vasilyeva A.V. Development of an automated system of scientific
researches for aerodynamic experiment 4

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

Babicheva M.V., Popov A.S., Yanovsky A.V. Automation of detective radio channels for
information leakage 9

Kurushin A.A. Electrodynamics design of radiating microwave transistor amplifier 14

COMPUTER SCIENCE AND COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

Babicheva M.V., Vasilenko D.V. Attacks to automated authentication systems on neural network
classifiers 23

Rushechnicov Y.I., Danilov V.V. Information technology of radiomonitoring based on software-
determined radio 31

Sharii T.V. Informativeness analysis of audio fragments for speech recognition under noisy
conditions 37

Danilov V.V., Timoshenko N.A., Tretiakov I.A. The basis of the element base of optical
information technologies 46

INDUSTRIAL HEAT AND POWER ENGINEERING

Kukharev A.L. Choice of rational energy parameters of multi-electrode electric furnace complexes 59

Zaharov N.I., Birukov A.B., Tupilko I.V., Shatovich V.A. Numerical research of processes of heat
and mass transfer in ladle degassing the molten metal by inert gas purging mode and energy
saving technology 72

ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN SERVICES

Nezdoiminov V.I., Golodenko N.N., Zavorotnyi D.V., Maistrenko O.V. Mathematical description
of hydrodynamic parameters of airlift bioreactor-clarifier 84

We are 55 97

Instructions for authors 104

Уважаемые коллеги!

Журнал «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» выходит на новый уровень. В 2019 году наш журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему РИНЦ (*Лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г. в ред. от 27.03.2019 г.*), а начиная с этого номера - включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (*Приказ МОН ДНР №440 от 06.03.2020 г.*) (Перечень ВАК). Это позволяет авторам статей нашего журнала указывать их в списке публикаций, в которых отражены основные научные результаты своих диссертационных исследований.

Также значительно расширена редакционная коллегия нашего журнала ведущими специалистами в соответствующих областях науки. Надеемся, что это позволит и дальше расширять географию наших авторов, а журнал будет полезен не только соискателям по соответствующим отраслям науки, но и студентам, научным работникам и представителям производства.

Обращаем Ваше внимание, что 1 номер нашего журнала 2020 года посвящен 55-летию со дня основания Физико-технического факультета ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», чему приурочена статья «НАМ – 55».

Главный редактор

В.В. Белоусов

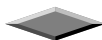
Зам. главного редактора

В.В. Данилов

Ответственный секретарь

И.А. Третьяков

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 533.6.08

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

© 2020 Пометун Е.Д., Хрипунов Р.А., Васильева А.В.

В статье описана виртуальная лаборатория, реализованная с использованием программного обеспечения NI LabVIEW. В основу данной лаборатории положен алгоритм преобразования выходных электрических сигналов термоанемометра постоянной температуры, в значения температуры и скорости при измерении в неизоатермическом газовом потоке. Представленная методика обеспечивает хорошее совпадение фактических и расчетных значений скорости и температуры потока воздуха в диапазонах $1 \div 10$ м/с и $20 \div 45^\circ\text{C}$.

Ключевые слова: LabVIEW, АСНИ, термоанемометр постоянной температуры, термокомпенсация, неизоатермический газовый поток.

Введение. В современных условиях наиболее надежными методами исследования являются методы, реализованные с использованием автоматизированных систем научных исследований (АСНИ). В совокупности с аэродинамическим экспериментом использование АСНИ помогает получить максимум экспериментальной информации при заданных условиях (по времени, затратам и т. д.).

Широко распространенным методом исследования состояния атмосферы, измерения параметров газовых потоков является термоанемометрический метод [1]. Термоанемометр (ТА) постоянной температуры является одним из наиболее широко используемых средств измерения параметров газовых потоков (температуры, скорости), обладающим малой тепловой и динамической инерцией.

В ТА постоянной температуры сопротивление и, следовательно, температура ЧЭ, поддерживаются постоянными с помощью схемы обратной связи (ОС), позволяющей улучшить динамические характеристики системы [2].

Целью данной работы является разработка автоматизированной системы научных исследований на базе программного обеспечения NI LabVIEW, позволяющей выполнять измерения скорости неизоатермического потока в реальном масштабе времени с помощью термоанемометра постоянной температуры.

Предлагаемая концепция построения виртуального измерительного комплекса на базе LabVIEW позволяет создать систему сбора и обработки измерительной информации в аэродинамическом эксперименте.

Описанный способ обработки выходного сигнала термоанемометров был реализован на основе ПО LabVIEW и успешно себя зарекомендовал на практике при измерении параметров неизоатермических газовых потоков.

Основная часть. Алгоритм обработки выходного сигнала термоанемометра постоянной температуры при измерениях параметров неизоатермических газовых

потоков основан на предположении о возможности разделения сложной функции, описывающей теплообмен датчика, в виде двух более простых: от температуры и скорости потока (числа Рейнольдса).

Зависимость теплообмена от числа Рейнольдса может быть представлена соотношением вида [1, 3]:

$$\frac{E_{TA}^2 \cdot d}{R_w \cdot \lambda_g \cdot S \cdot (T_w - T_g)} \left(\frac{T_g}{T_m} \right)^{0.17} = A + B \cdot \text{Re}^n, \quad (1)$$

где: E_{TA} – электрическое напряжение ТА при текущей скорости потока, d – диаметр нити, R_w – сопротивление нагретой нити, λ_g – теплопроводность газа, S – площадь поверхности нити, T_w – температура нити, T_g – температура газа, $T_m = \frac{T_w + T_g}{2}$ – поверхностная температура нити; A, B – константы, $\text{Re} = \frac{V \cdot d}{\nu}$ – число Рейнольдса.

В соотношении (1) основной вклад в погрешность измерения скорости, вызванную изменением температуры потока, вносит температура перегрева $(T_w - T_g)$, при этом изменение теплофизических свойств газа и ЧЭ оказывает значительно меньшее влияние – минимальной зависимости от температуры соответствует запись этих преобразований относительно скорости потока, а не числа Рейнольдса [8]. Представим соотношение (1) в виде:

$$W_{TA} = \frac{E_{TA}^2}{R_w} = C_1 \cdot f(V) \cdot f(T) = C_1 \cdot f(V) \cdot \left(\frac{T_m}{T_g} \right)^{0.17} \cdot (T_w - T_g), \quad (2)$$

где: $C_1 = \frac{\lambda_g \cdot S}{d} \cdot C_0$, C_0 – коэффициент.

После определения явного вида термокомпенсирующей функции [5] решается задача определения линеаризирующей функции: $V = f\left(\frac{W_{TA}}{f(T)}\right)$. Полученные соотношения используются в программах обработки электрических сигналов термоанемометрического комплекса.

С целью проверки описанного метода преобразования сигналов при измерении скорости в неизотермических газовых потоках были выполнены экспериментальные исследования на установке АДС–200/250 [4]. Автоматическая система управления АДС–200/250 позволяет устанавливать стабилизированные значения следующих параметров: температуры – от комнатной до 60°C и скорости потока воздуха – от 1 до 40 м/с. Значение скорости контролируется с помощью трубки Пито–Прандтля и манометра МЕТРАН–100ДД. Для сбора и хранения полученной информации использовался комплекс фирмы National Instruments (блок сбора данных SCB-68 и АЦП PCI/e 6323). NI SCB-68 HSDIO представляет собой электронный коммутатор состоящий из экранированного блока ввода / вывода с 72 винтовыми клеммами для подключения 16 аналоговых и 16 цифровых входных сигналов. На вход АЦП электрические сигналы передаются по кабелю стандарта (VHDCI). АЦП PCIe6323 имеет 32 простых аналоговых входа или 16 дифференциальных входов. Максимальное

числом выборок равно 250 000 в секунду, при разрешении 16-бит, и в диапазоне входного аналогового сигнала ± 10 В.

Обработка полученных данных выполнялась в виртуальной лаборатории в среде графического программирования LabVIEW. Разработанный алгоритм, положенный в основу данной лаборатории, позволяет выполнять измерения температуры с погрешностью $0,1^{\circ}\text{C}$ и скорости 2%.

Окно первичной обработки выходного сигнала ТА приведено на рисунке 1.

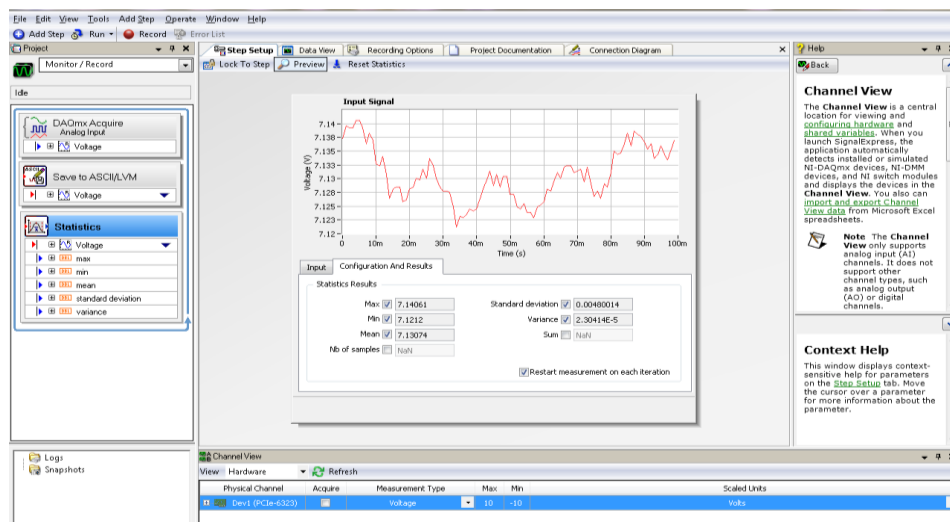


Рис. 1. Программное окно настроек LabVIEW (SignalExpress)

Разработанная виртуальная лаборатория состоит из блока сбора данных, термокомпенсации и линейаризации выходного сигнала, а так же статистической обработки (оценка среднего арифметического значения и среднего квадратическое отклонения). Окно блок – диаграммы приведено на рисунке 2.

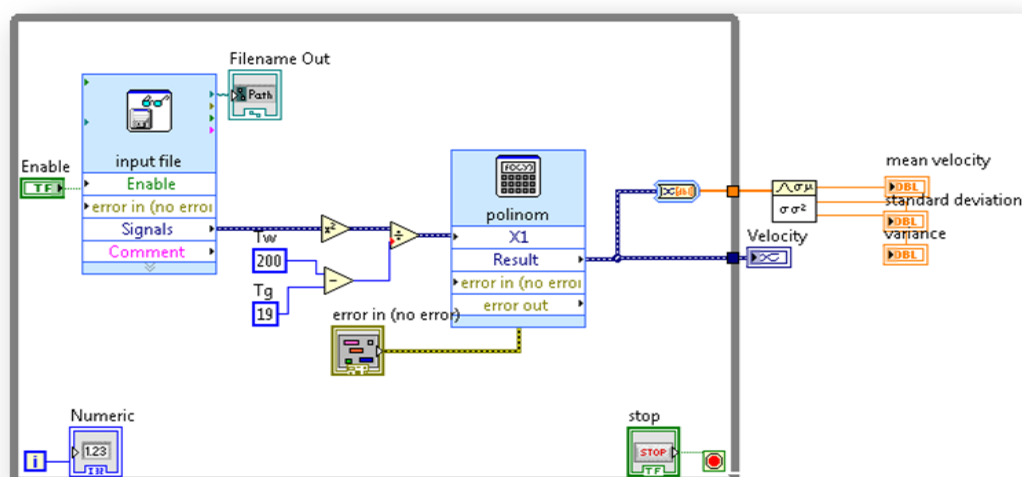


Рис. 2. Блок – диаграмма виртуальной лаборатории

Лицевая панель виртуальной лаборатории, с которой непосредственно работает пользователь, приведена на рисунке 3.

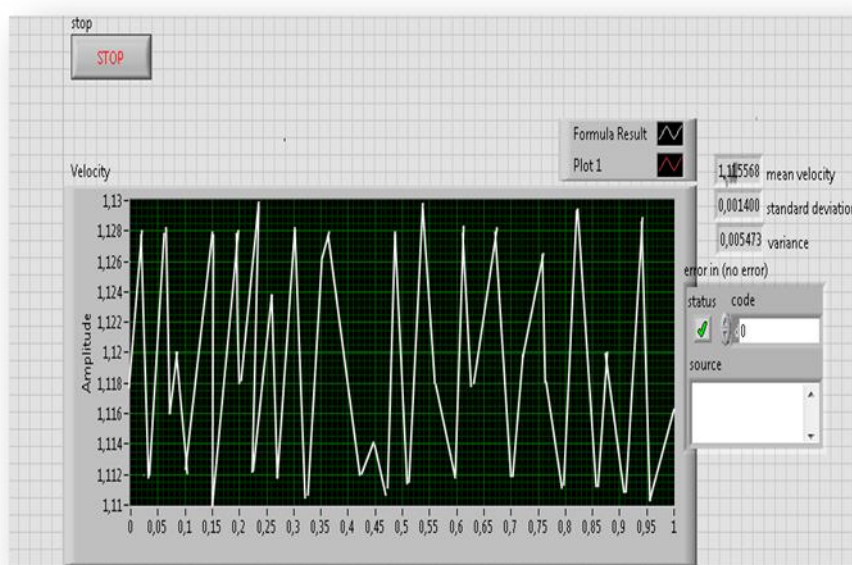


Рис. 3. Лицевая панель ВП

Представленная методика применима в диапазонах: скорость $1 \div 10$ м/с и температуры потока воздуха $20 \div 45^\circ\text{C}$.

Выводы. Разработана автоматизированная система научных исследований для аэродинамического эксперимента в среде графического программирования LabVIEW. Данная виртуальная лаборатория предназначена для обработки выходных сигналов ТА при измерении скорости и температуры неизотермического газового потока в реальном масштабе времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ярин Л. П. Термоанемометрия газовых потоков / Л. П. Ярин, А. Л. Генкин, В. И. Кулес. – Ленинград : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 198 с.
2. Пометун Е. Д. Сравнение чувствительности термоанемометров двух типов: импульсного и постоянной температуры / Е. Д. Пометун, Д. Н. Кузнецов // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. – 2013. – № 1(4)-2(5). – С. 107-109.
3. Украинский Ю. Д. Аппроксимация степенной функцией теплоотдачи термистора в режиме датчика термоанемометра постоянной температуры / Ю. Д. Украинский // тез. Докл. Мелекино. 2002. С. 3-7.
4. Пометун Е. Д. Исследование функций аппроксимации градуировочной характеристики термоанемометра в неизотермическом газовом потоке / Е. Д. Пометун, В. Н. Лебедев // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе : сборник научных трудов. – Донецк : ДонНТУ, 2015. – № 1(8)–2(9)'2015. – С. 88-91.
5. Пометун, Е. Д. Оценка погрешности измерения средней скорости с помощью термоанемометра в высокотурбулентных газовых потоках / Е. Д. Пометун, Н. И. Болонов, В. В. Белоусов, В. Н. Лебедев, П. С. Гелашвили // Системы обеспечения техносферной безопасности: материалы VI Всерос. науч. конф. и шк. для молодых ученых. – 2019. – С. 155 – 158.

Поступила в редакцию 23.03.2020 г.

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM OF SCIENTIFIC RESEARCHES FOR
AERODYNAMIC EXPERIMENT

Pometun E.D., Khripunov R.A., Vasilyeva A.V.

The article describes a virtual laboratory implemented in NI LabVIEW software. The basis of this laboratory is an algorithm for converting the output electrical signals of constant temperature and constant current anemometers to temperature and velocity values when measured in a non-isothermal gas stream. The presented method provides a good agreement between the actual and calculated values of the velocity and temperature of the air flow in the ranges of $1 \div 10$ m / s and $20 \div 45^\circ\text{C}$.

Keywords: LabVIEW, automated research system, constant temperature anemometer, temperature compensation, non-isothermal gas flow.

Пометун Екатерина Дмитриевна

старший преподаватель кафедры физики
неравновесных процессов метрологии и экологии
им. И.Л. Повха ГОУ ВПО «Донецкий
национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: alternativa19031992@rambler.ru

Pometun Ekaterina Dmitrievna

Lecturer at Department of Physics of nonequilibrium,
Metrology and Ecology Processes named after I.L.
Povkha Technologies of Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

Хрипунов Роман Анатольевич

студент кафедры физики неравновесных процессов
метрологии и экологии им. И.Л. Повха ГОУ ВПО
«Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.

Khripunov Roman Anatolievich

Student at Department of Physics of nonequilibrium,
Metrology and Ecology Processes named after I.L.
Povkha Technologies of Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

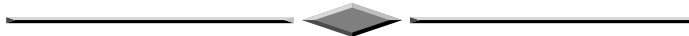
Васильева Анна Васильевна

студент кафедры физики неравновесных процессов
метрологии и экологии им. И.Л. Повха ГОУ ВПО
«Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.

Vasilyeva Anna Vasilievna

Student at Department of Physics of nonequilibrium,
Metrology and Ecology Processes named after I.L.
Povkha Technologies of Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ



УДК 681.518.5

АВТОМАТИЗАЦИЯ СРЕДСТВ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОКАНАЛОВ УТЕЧКИ ИНФОРМАЦИИ

© 2020 *Бабичева М.В., Попов А.С., Яновский А.В.*

Разработан лабораторный стенд автоматизированного программно-аппаратного модуля для обнаружения несанкционированного электромагнитного излучения в диапазоне 85-115МГц. Проведены тестовые испытания и калибровка на макетах радиомикрофонов. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных при помощи разработанного модуля с результатами полученными, при помощи программно-аппаратного модуля SDRSharp. Намечены пути дальнейшей автоматизации устройства.

Ключевые слова: FM-диапазон, несанкционированные излучения, автоматизированный программно-аппаратный модуль.

Введение. Радиоэлектронные системы получают все большее распространение, поэтому важное значение в разведывательной деятельности приобретает радиотехническая разведка. Радиозакладные устройства для съема и передачи информации становятся доступными не только специалистам и работникам спецслужб, но и обычным гражданам. Для обнаружения радиозакладных устройств используются комплексы, которые сравнивают спектры излучения в контролируемом помещении, снятые в различные промежутки времени для выявления несанкционированных излучений. При этом важным аспектом является не только прием и усиление сигнала, но и преобразование его в цифровой вид для последующей обработки. Это обеспечивает создание полностью или частично автоматизированных комплексов, применяющих последние компьютерные разработки, в частности искусственный интеллект [1,2]. Рассмотрению достоинств и недостатков подобных систем на примере автоматизированного приемника радиоизлучений в FM диапазоне посвящена данная работа.

Макет разведывательного приемника радиоизлучений. На рисунке 1 представлена структурная схема разработанного приемника.

Структурно устройство можно разбить на четыре блока:

- 1) Непосредственно приемник, на основе микросхемы TDA7021.
- 2) R-2R цифроаналоговый преобразователь на сдвиговом регистре и резисторах R11-R21.
- 3) Модуль связи с персональным компьютером на основе платы Digispark.
- 4) Усилитель для наушников (для прослушивания найденных несущих) и усилитель с детектором для считывания относительного уровня модуляции найденных несущих.

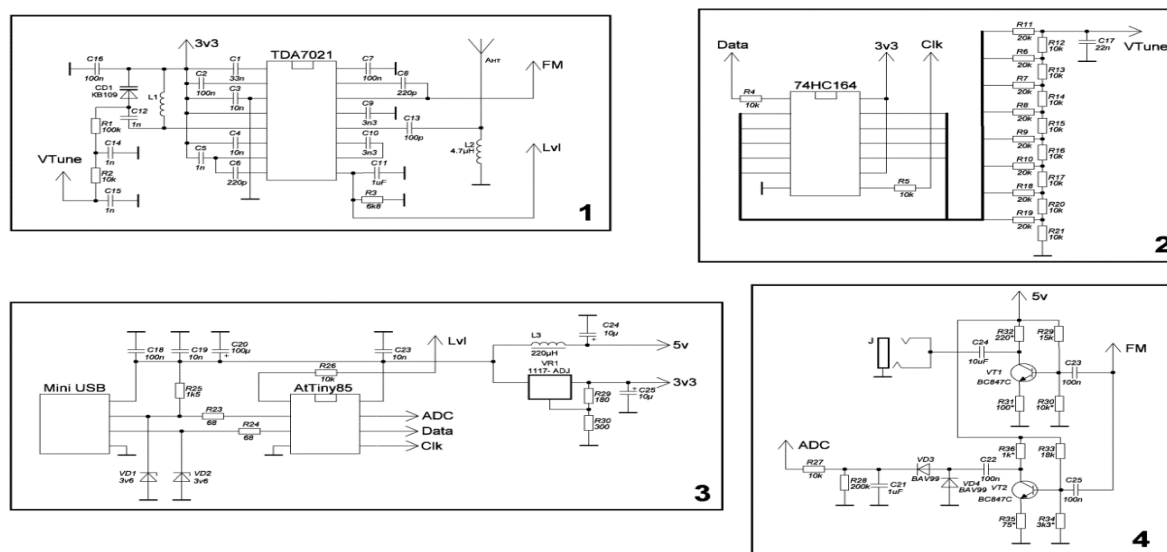


Рис. 1. Структурная схема приемника радиоизлучений

Микроконтроллер ATtiny85 не только получает данные о наличии и глубине модуляции, но и может перестраивать гетеродин приёмника, обеспечивая сканирование. На рисунке 2 представлен внешний вид сканирующего приемника и процесс работы с программно-аппаратным макетом.



Рис. 2. Внешний вид сканирующего приемника, подключенного к персональному компьютеру и процесс обнаружения оператором несанкционированных радиоизлучений

Программное обеспечение. Программное обеспечение состоит из двух частей: программа для микроконтроллера ATtiny85, написанная в среде ARDUINO IDE v1.8.2 и программа для персонального компьютера, разработанная в среде Delphi 7. Программа для микроконтроллера управляет гетеродином приемника, осуществляет передачу оцифрованного сигнала с цифроаналоговых преобразователей вычитывает и усредняет по 10 замерам данные с двух АЦП. В зависимости от принятых команд от ПК выполняет надстройку ЦАП на указанную частоту, сканирование, передачу полученных данных на ПК. Сканирование выполняется путем снятия значений с двух АЦП (первый – девиация частоты, второй – уровень несущей) на частоте, указанной в ЦАП. После замера уровней с АЦП производится усреднение показаний и отправка данных на COM-порт ПК. Программа для персонального компьютера помимо стандартных компонентов использует библиотеку VComPort позволяющую работать с COM-портом.

Интерфейс программы представлен на рисунке 3. Выполняется сканирование COM-портов и подключение к приемнику. Далее передаются значения для надстройки ЦАП (от 5 до 255), и по истечению заданного интервала сканирования запрашивается значение с двух АЦП. В дальнейшем эти данные используются для построения графиков. Так же предусмотрена возможность настройки приемника на заданную частоту кликом по построенному графику. На рисунке 3 на Графике №2 показан спектр с излучением радиовещательных станций, а на Графике №1 показана та же частотная область с включенным макетом закладного устройства. Обнаружение закладного устройства производится по появившемуся пику на спектрограмме. Справа выводятся значения, по которым строились графики, которые можно использовать для компьютерных экспериментов и калибровки.

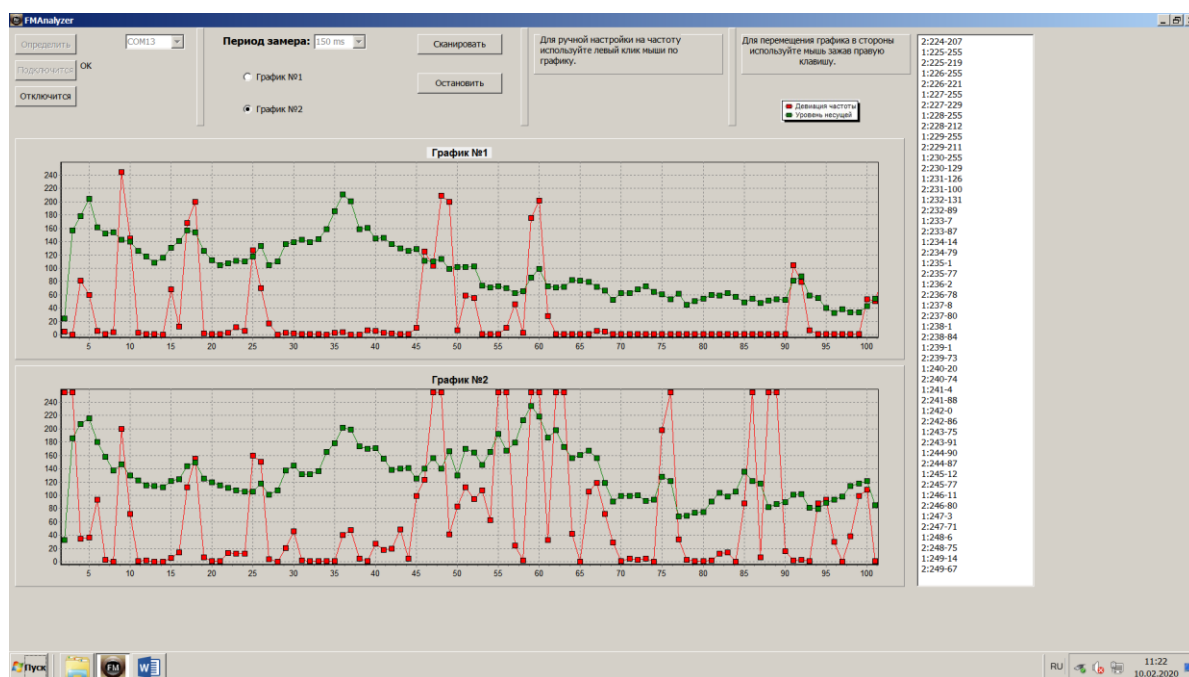


Рис. 3. Интерфейс программы для автоматизированного сканирования FM-диапазона

После сборки и настройки модуля радиоразведки был проведен ряд тестовых экспериментов. Получены графики для принимаемых частот, в FM диапазоне, и затем были включены радиомикрофоны, имеющиеся в лаборатории, работающие в том же частотном диапазоне частот. Демодулированный сигнал отчетливо слышен в телефонах.

Результаты. Разработан и реализован лабораторный стенд программно-аппаратного модуля для обнаружения несанкционированного электромагнитного излучения в диапазоне 85-115 МГц. Доработана принципиальная электрическая схема, написаны программы для прошивки микроконтроллера ATtiny85 на алгоритмическом языке C и состыковки модуля с персональным компьютером на языке Pascal. Проведены тестовые испытания и калибровка разработанного программно-аппаратного модуля на макетах радиомикрофонов. Проведен сравнительный анализ результатов, полученных при помощи разработанного модуля с результатами полученными, при помощи программно-аппаратного модуля SDRSharp. Планируется подключение программных модулей для интерполяции получаемых кривых и определения наличия разницы в радио обстановке в одном и том же частотном диапазоне в различные промежутки времени для полной автоматизации приемника. Разработанный программно-аппаратный модуль будет использован в лаборатории технической защиты информации в лабораторном практикуме курса «Техническая защита информации» специальности 10.03.01 «Информационная безопасность».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радзиевский В. Г. Теоретические основы радиоэлектронной разведки / В. Г. Радзиевский, А. А. Сирота. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Радиотехника, 2004. – 432 с.
2. Подстригаев А. С. Широкополосная приемная система станции РЭБ / А. С. Подстригаев, А. И. Беззуб // Технические науки: проблемы и перспективы : материалы II Международной научной конференции (г. Санкт-Петербург, апрель 2017 г.). – Санкт-Петербург : Заневская площадь, 2017. – С. 29-32.

Поступила в редакцию 02.04.2020 г.

AUTOMATION OF DETECTIVE RADIO CHANNELS FOR INFORMATION LEAKAGE

Babicheva M.V., Popov A.S., Yanovsky A.V.

A laboratory bench for an automated software and hardware module for detecting unauthorized electromagnetic radiation in the range 85-115 MHz was developed. Testing and calibration the models of radio microphones were carried out. A comparative analysis of the results obtained using the developed module with the results obtained using the hardware-software module SDRSharp was carried out. The ways of further device automation are outlined.

Keywords: FM band, unauthorized radiation, automated software and hardware module.

Бабичева Маргарита Вадимовна

ст. преподаватель кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: m.v.babicheva60@gmail.com

Babicheva Margarita

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

Попов Александр Сергеевич

студент кафедры радиопластики и
инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО
«Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: logan2009@i.ua

Popov Alexander Sergeevich

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

Яновский Александр Вадимович

аспирант кафедры радиопластики и
инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО
«Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: alexyana1994@mail.ru

Yanovsky Alexander Vadimovich

Postgraduate student at Department of Radiophysics
and Infocommunication Technologies of Donetsk
National University,
DPR, Donetsk.

УДК 621.354.76

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ИЗЛУЧАЮЩЕГО ТРАНЗИСТОРНОГО СВЧ УСИЛИТЕЛЯ

© 2020 Курушин А.А.

Для моделирования транзисторных СВЧ усилителей предлагается использовать электродинамический метод расчета, транзистор представляется в виде восьмиполюсника (четырёхпортовой схемы). Это позволяет выполнить проектирование с учетом излучения и взаимной связи между отдельными фрагментами согласующей структуры произвольной формы.

Ключевые слова: Транзисторный СВЧ усилитель, устойчивость, согласование, электродинамический расчет, активная антенна, FEKO.

Введение. Проектирование транзисторных усилителей (ТУ) СВЧ в бурные десятилетия освоения сантиметрового диапазона волн было основано на матричном исчислении и методах теории цепей, в основу которых была положена теория Куракавы [1]. По этой теории коэффициент устойчивости, а также оптимальные коэффициенты отражения определяются через элементы матрицы рассеяния транзистора, а также коэффициенты отражения в сечении активного элемента. Очень важным параметром является устойчивость работы усилителя в широком диапазоне частот. Устойчивость работы структуры, в которую включены активные элементы, оценивается инвариантным коэффициентом устойчивости [1, 2]:

$$k = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |\Delta_S|^2}{2|S_{21}S_{12}|}, \quad (1)$$

где S_{ij} – S параметры двухпортовой структуры, $\Delta_S = S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12}$.

Коэффициент устойчивости Куракавы показывает степень пересечения окружности неустойчивой работы с плоскостью диаграммы Смита входного и выходного коэффициента отражения. Для получения абсолютной устойчивости нужно, чтобы коэффициент устойчивости был больше единицы во всем рабочем диапазоне частот. Если расчет по этой формуле дает коэффициент устойчивости, меньший 1, то это означает, что должны быть предприняты специальные условия, чтобы исключить самовозбуждение усилителя.

Электродинамический расчет ТУ СВЧ. Как альтернатива применению S-параметров, можно выполнить электродинамический расчет СВЧ-структур [3], в которые включены активные элементы (рис. 1), что позволяет рассчитать и улучшить характеристики микрополоскового многотранзисторного СВЧ-усилителя.

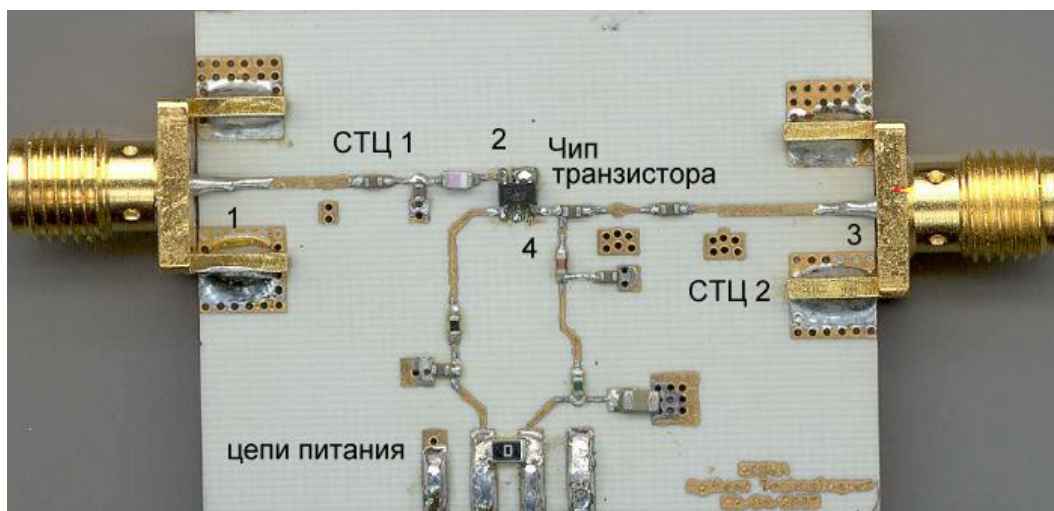
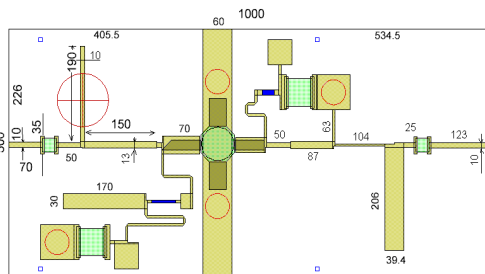
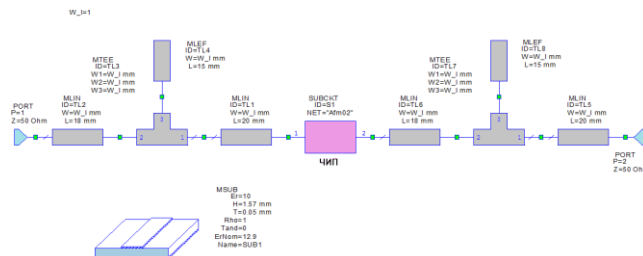


Рис. 1. Транзисторный СВЧ-усилитель на диэлектрической подложке с согласующе-трансформирующими цепями (СТЦ) на входе и выходе

Отметим, что до сих пор наиболее часто при расчете ТУ СВЧ используются методы теории цепей, к которым относится метод Олинера [2-5]. Метод Олинера использует формулы расчета модели распределенных цепей, и не учитывает связь по ближнему полю между отдельными элементами, входящими в структуру. Такой подход реализован, например, в широко распространенной в практике проектирования программы **MWO** [3], в которой расчет ведется в схемном и топологическом представлении (рис. 2 а, б).



а) Топология транзисторного СВЧ-усилителя, созданная в MWO



б) Схема транзисторного СВЧ-усилителя, составленная из узлового включения распределенных элементов

Рис. 2

Внедрение электродинамического метода расчета, реализованного в **MWO** [3], требует обязательного экранировки блоков согласующих структур. Для удаления экранирующих стенок от портов применяется операция разгерметизации. Порты-перемычки, реализованные в этой программе должны обязательно быть соединены с земляной платой. Это накладывает ограничения на построение сложных СВЧ структур с активными элементами.

Выполним электродинамический расчет транзисторного СВЧ усилителя с помощью 3D программы **FEKO**, используя метод моментов. При расчете в **FEKO** транзистор будет включен во внутренние порты, созданные в разрыве микрополосковой линии. К выходной линии подключена излучающая структура –

антенна. В СВЧ-усилителе используем транзистор, созданный в г. Великий Новгород [6].

Модель транзистора, заданная в виде таблицы S-параметров, включается в структуру усилителя СВЧ в виде восьмиполюсника. Этот восьмиполюсник (на СВЧ восьмиполюсник реализуется как четырехпортовая структура) называется неизлучающей цепью и подключается к портам, заданным в структуре.

Расчет электродинамическим способом в программе **FEKO** (в отличие от **MWO**, где для моделирования отдельных частей согласующей структуры (СТЦ1 и СТЦ2) нужно создавать отдельные экранирующие боксы) выполняется в полной структуре, в которую включаются активные элементы (рис. 3). Таким образом, электродинамические связи между согласующими структурами учитываются так, как будто согласующие структуры работают как передающие и приемные антенны.

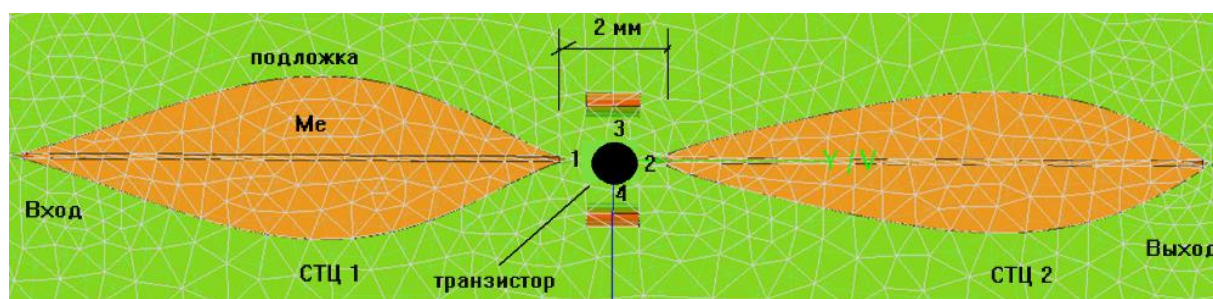


Рис. 3. Структура микрополоскового усилителя на транзисторе на диэлектрической подложке, рассчитываемая как открытая электродинамическая структура в FEKO

Транзисторные усилители в волноводном исполнении [8], предпочтительны, начиная с 10 ГГц, когда потери микрополосковых линий возрастают, и начинают вносить значительный вклад в коэффициент шума [6].

Как выполняется моделирование устройства, состоящего из СВЧ структуры, в которую включены активные элементы, имеющие несколько проводов, по которым течет ток? Активные элементы включаются в СВЧ структуру в точках, и следовательно речь идет об объединении электродинамического метода расчета и метода, основанного на теории цепей.

Метод Олинера использует модели распределенных цепей в виде дискретных элементов, и не учитывает связь по ближнему полю между элементами, входящими в структуру. Такой подход реализован в программе Microwave Office [3], когда моделирование выполняется в схемном и топологическом представлении (2D-представление). Если СВЧ структура рассчитывается в утилите EMSight (2.5D-представление), в которой выполняется электродинамический расчет, то S-параметры или модель активных элементов добавляются на уровне схемы, т.е. узлы активных элементов подключаются во внутренних портах структуры ТУ СВЧ. Аналогичное объединение решений, полученных разными методами, выполняются и в HFSS Designer (3D представление СВЧ структуры) (первая линия рис. 4).

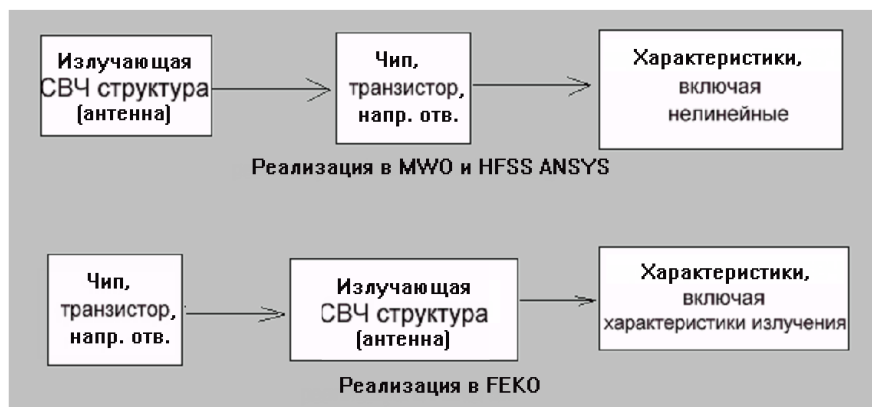


Рис. 4. Два метода объединения неизлучающей цепи (транзистора и электродинамической структуры)

Подход, реализованный в FEKO, предполагает включение активного элемента в электродинамическую структуру (вторая линия рис. 4). Здесь сначала выполняется расчет методами теории цепей, а затем выполняется электродинамический анализ. В этом случае взаимная связь входной и выходной согласующей структуры учитывается автоматически, и появляется возможность рассчитать характеристики ближнего и дальнего поля структуры, в которую включены активные элементы. Транзистор будет включен во внутренние порты, созданные в разрыве входной и выходной согласующей структуры (рис. 5). Модель транзистора, заданная в виде таблицы S-пара-метров, включается в структуру СВЧ усилителя в виде четырехпортовой схемы. Этот многополюсник называется неизлучающей цепью и подключается к внутренним портам структуры.

Включение транзистора в излучающую структуру. Соединение неизлучающей цепи с СВЧ структурой выполняется в FEKO в диалоге, как показано на рис.5. Многополюсник, описывающий поведение транзистора, может быть определен в терминах S-, Y- или Z-параметров, а также импортирован как внешний файл Touchstone, или вручную задан в CADFEKO. Если параметры задаются вручную в CADFEKO, то можно использовать максимум 4 порта, и для каждого порта должны быть определены опорные импедансы.

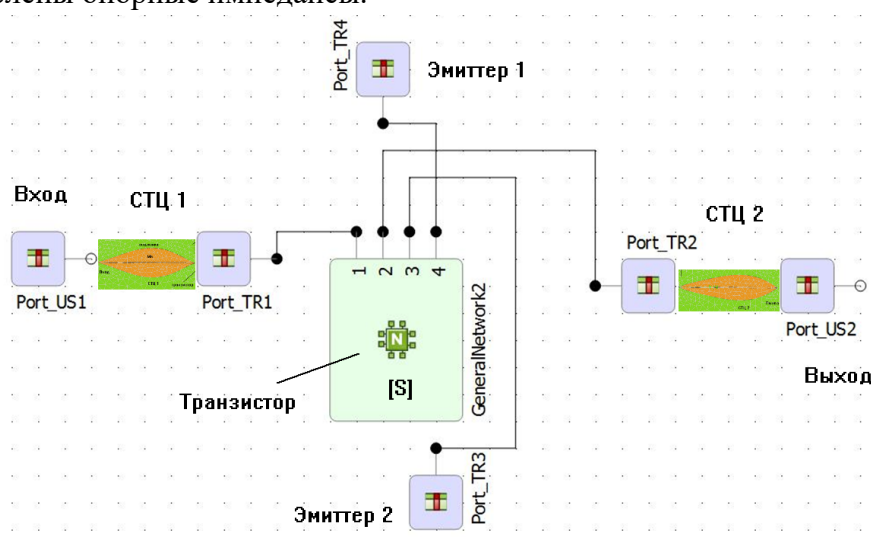
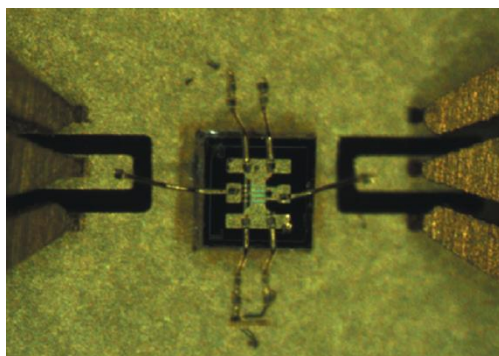


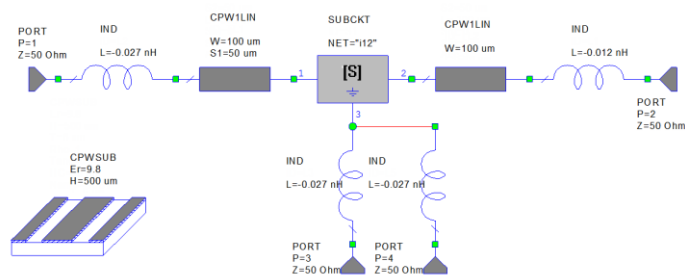
Рис. 5. Схема соединения транзистора как восьмиполюсника и электродинамической СВЧ структуры в FEKO

Для моделирования транзисторного СВЧ усилителя, в случае классического крепления транзистора на микрополосковой плате, находящейся в волноводной структуре, применяются порты на ребре, которые включаются между внешней линией и линией в корпусе транзистора.

Традиционное представление транзистора как усилительного элемента – это четырехполюсник, или двухпортовой АЭ, описываемый S матрицей 2×2 (4 комплексных числа). Современный СВЧ транзистор – это чаще всего чип, который сам по себе состоит из многих активных элементов, включенных, не обязательно, по схеме с общим эмиттером. Чипы транзисторов подключаются к согласующим структурам с помощью проволоочек.



а)



б)

Рис. 6. Схема транзистора в MWO, использующая модель транзистора и параллельные порта на эмиттере
4 портовое представление транзистора

Используя структуру рис. 6 а, рассчитаем S -параметры четырехпортовой схемы в программе **MWO**, а затем в FEKO с учетом электродинамической связи. Такой способ получения S -параметров можно назвать универсальным, поскольку из нелинейной модели транзистора [6] можно получить линейные S -параметры в виде 4-х портовой схемы (восьмиполусника). S -параметры на частоте 30 ГГц приведем в Табл.1.

Табл.1. Матрица 4х4 S -параметров транзистора, представленного в виде 4-х портовой схемы на частоте 30 ГГц.

$S_{11} = 0.77 \angle -156.7^\circ$	$S_{12} = 0.48 \angle 35.3^\circ$	$S_{13} = 0.59 \angle 14.7^\circ$	$S_{14} = 0.6 \angle 14.6^\circ$
$S_{21} = 2.0 \angle 41.9^\circ$	$S_{22} = 0.5 \angle -102.1^\circ$	$S_{23} = 0.36 \angle 159^\circ$	$S_{24} = 0.36 \angle 159^\circ$
$S_{31} = 0.17 \angle -145^\circ$	$S_{32} = 0.51 \angle 44.7^\circ$	$S_{33} = 0.22 \angle -129.7^\circ$	$S_{34} = 0.83 \angle 2^\circ$
$S_{41} = 0.17 \angle -145^\circ$	$S_{42} = 0.51 \angle 44.7^\circ$	$S_{43} = 0.83 \angle 2^\circ$	$S_{44} = 0.22 \angle -129.7^\circ$

Из табл. 1 видим, что в 16 элементной S -матрице транзистора имеют место эквивалентности: $S_{13}=S_{14}$, $S_{31}=S_{41}$, $S_{32}=S_{42}$, $S_{23}=S_{24}$, $S_{33}=S_{44}$ и $S_{34}=S_{43}$.

S -параметры в диапазоне частот импортируются в программу FEKO, в которой выполняется электродинамический расчет этой модели. Перевод этого ЧП в трехпортовую схему, а затем в двухпортовую выполним, вводя фиксированные структуры обратной связи (рис. 6 б). Если в этой схеме заземлить 3 и 4 порт, то очевидно, что характеристики будут такими как в случае двухпортового представления. Это позволяет выполнить верификацию четырехпортовой модели транзистора, с измеренными экспериментальными данными. Расчеты показали, что усиление каскада наибольшее при включении транзистора в линию в виде проволоочек (рис. 6.а). Этот факт подтверждается экспериментально [6].

Электродинамический учет обратной связи в ТУ СВЧ. Используя такое четырехпортовое представление транзистора, можно выполнить учет обратной связи, включенной в структуру ТУ СВЧ [5]. Расчеты и оптимизация ТУ СВЧ показывают, что включение СВЧ транзистора по схемам ОЭ, ОК, ОБ, которые имеют особенности в диапазоне низких и ВЧ частот – в СВЧ диапазоне теряет этот смысл, и влияют только на смещение по постоянному току. Нужно добавить, что сам СВЧ транзистор представляет собой чип, и состоит из многих транзисторов интегральной СВЧ схемы с сумматорами и разделительными мостами [8].

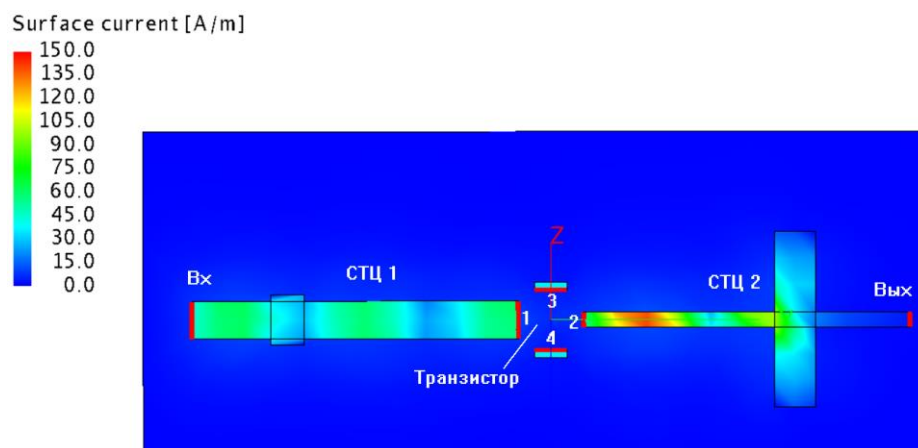


Рис. 7. Ток на токонесущих поверхностях транзисторного СВЧ усилителя

Транзистор на рис. 7 включен в виде четырехпортовой схемы, причем если эмиттерные выводы накоротко присоединены к земле, обратная связь по цепи эмиттерных линий исчезает. Остается только обратная связь «по воздуху». Сравнение расчетных характеристик на рис. 8 показывает изменение частотной характеристики при учете электродинамических свойств структуры (линия MWO – без учета электродинамической связи, линия FEKO – учетом поля, окружающего пространство над транзистором).

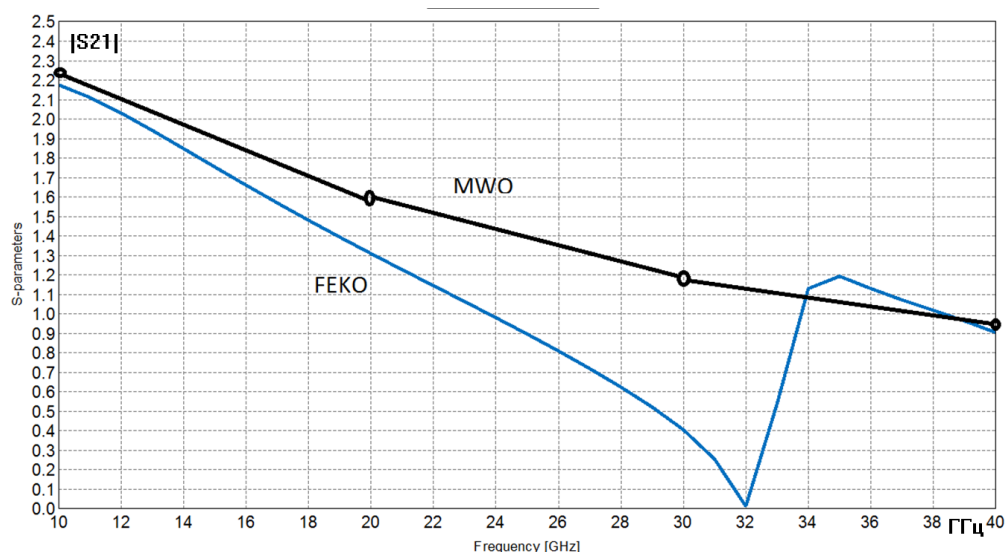


Рис. 8. АЧХ коэффициента передачи СВЧ усилителя (рис. 6), рассчитанные без учета связи по полю (MWO) и с учетом электромагнитной связи (FEKO)

Из рис. 8 видно, что влияние электродинамической связи между входной и выходной согласующей структуры проявляется не только уменьшением усиления, но и появлением точки запираия 32 ГГц, объясняющегося резонансными свойствами электродинамической структуры.

Электродинамический подход позволяет, вслед за методом, предложенным в [7], выполнить и оптимизировать СВЧ усилитель с произвольной формой согласующих структур. Каждый из элементов, включая формы, накрадывающиеся друг на друга, а также с произвольной конфигурацией, можно параметризовать, что приводит к согласующей структуре сложной, непредсказуемой формы.

Моделирование транзисторного СВЧ усилителя электродинамическим методом позволяет оценить также усилитель как активную антенну. На рис. 9 а показано, как все токонесущие согласующие структуры вносят свой вклад в излучение в дальнюю зону. КПД и потери также становятся характеристикой, влияющей на устойчивость ТУ СВЧ и усиление.

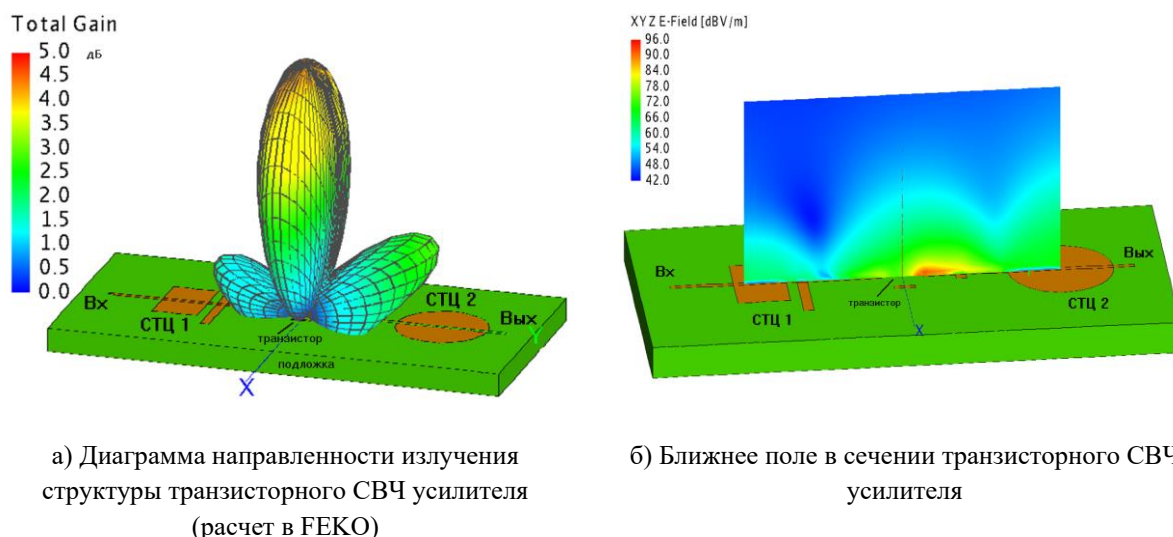


Рис. 9

Из полученных данных полях излучения (рис. 9 а) и ближнего поля в сечении (рис. 9 б), можно видеть высокий уровень связи между входной и выходной согласующей структурой, которая осуществляется через пространство излучения. Таким образом, электродинамический метод привносит новое качество в расчет: поля реально учитываются в расчете.

Чем больше площадь согласующей структуры, тем больше электродинамические связи, что приводит к меньшей устойчивости усилителя. Но имеются частоты, на которых имеет место подавление коэффициента передачи (например, на частоте 24 ГГц, рис. 10). Покажем, как изменяется частотная характеристика однокаскадного усилителя, при оптимизации входных и выходных согласующих структур, и оптимизации структуры, входящей в систему обратной связи.

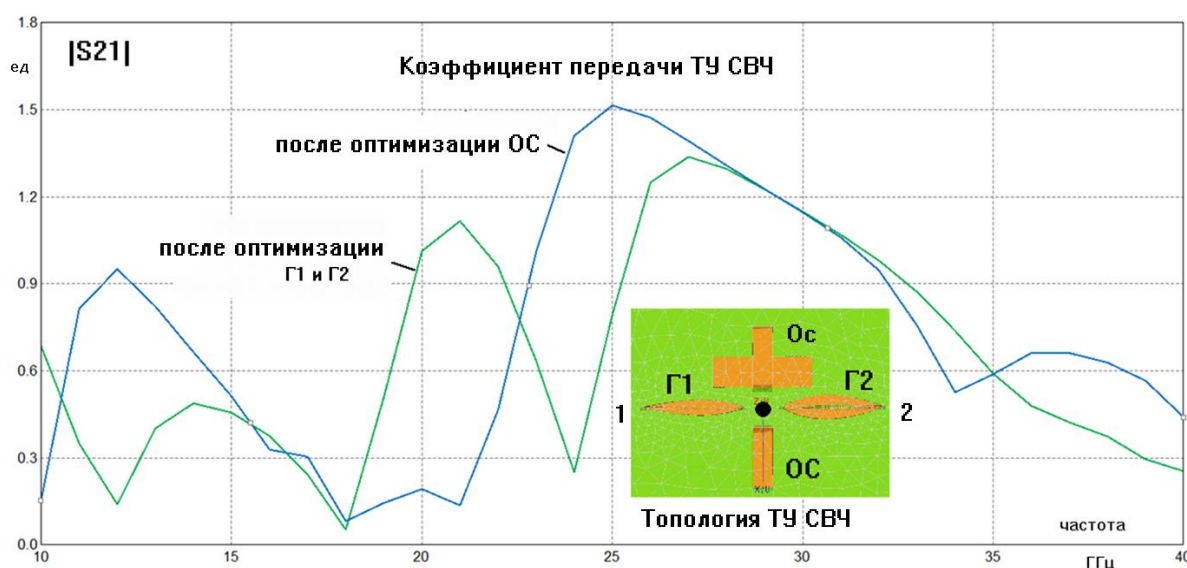


Рис. 10. Частотные характеристики одностранисторного СВЧ усилителя, полученные оптимизацией согласующих структур по входу и выходу Г1 и Г2, а также оптимизацией структуры, формирующей обратные связи ОС

Сравнение рассчитанных частотных характеристик (рис. 10) показывает, что, настраивая обратную связь можно получить такое же усиление, как и при согласовании входной и выходной согласующей цепями. Из рис. 10 видно, что в районе 25 – 35 ГГц усиление достигается того-же значения. Независимо от того, какие элементы – согласующие структуры на входе и на выходе меняются при оптимизации по критерию усиления, или структуры обратной связи использовать для оптимизации. Подстройка каскада с помощью обратной связи, или с помощью входной и выходной согласующей цепи приводит к одному результату. Можно показать, что максимальное усиление достигается любым способом и принимает одно значение на выбранной частоте. Обратим внимание, что на низких частотах принято считать, что схема с ОК – это та же схема с ОЭ, но со 100% обратной связью. В транзисторных СВЧ усилителях теряют смысл метод включения с ОК, ОЭ и ОБ, поскольку такие включения приводят к одному результату.

При проектировании ТУ СВЧ с расширенным динамическим диапазоном (ДД), выходную СТЦ нужно настраивать по критерию получения максимальной выходной мощности, т.е. расширению верхней границы ДД, а входную СТЦ – по критерию минимального КШ [5]. Из-за явления излучения и взаимной связи между входной и выходной согласующей структурами, формулы для сопряженного согласования [1-2] приобретают ошибку, соизмеримую с двукратным уменьшением максимального усиления. Излучаемая в пространство мощность меняет соотношение между падающими и отраженными волнами в сечении портов.

При моделировании и создания СВЧ усилителя мм волн, начинает играть важную роль поляризация [8], которая влияет на усиление и устойчивость. С внедрением современных САПР СВЧ, теория Курикавы [1], на которой была основана теория автономных СВЧ многополюсников, переводится на новый электродинамический уровень. Теория согласования с учетом электродинамической связи требует значительной коррекции.

Электродинамический расчет СВЧ структур, в которые включены активные элементы, открывает новые возможности, как для улучшения характеристик традиционных структур, так и для создания таких уникальных структур, как волноводных многотранзисторных СВЧ усилителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kurokawa K. Power Waves and Scattering Matrix / K. Kurokawa // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1965. – Vol. 13, Is. 2, March. – P. 194-202.
2. Шварц Н. З. Линейные транзисторные усилители СВЧ / Н. З. Шварц. – Москва : Советское радио, 1980. – 368 с.
3. Разевиг В. Д. Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office / В. Д. Разевиг, Ю. В. Потапов, А. А. Курушин. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2003. – 496 с.
4. Бабак Л. И. Структурный синтез СВЧ полупроводниковых устройств на основе декомпозиционного подхода / Л. И. Бабак // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 8. – С. 160-165.
5. Текшев В. Б. Шумовые характеристики транзисторных усилителей с обратной связью / В. Б. Текшев // Радиотехника. – 1985. – Т. 40, № 5. – С. 37-39.
6. Расчет МШУ на отечественной ЭКБ с помощью САПР AWR / Н. Н. Петух, Ю. С. Белоусов, А. П. Гарбузенко, К. О. Дарюшкин // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2016. – Т. 3, вып. 1. – С. 79-91.
7. Синтез транзисторных СВЧ усилителей / Т. А. Бочарова, С. И. Подковырин, А. А. Курушин, В. Б. Текшев // Электронная техника. Серия 1: Электроника СВЧ. – 1982. – № 2. – С. 68-74.
8. Курушин А. А. Проектирование объемных интегральных схем СВЧ / А. А. Курушин, Е. И. Нефёдов, С. М. Смольский. – Москва : One-Book, 2019. – 457 с.

Поступила в редакцию 07.04.2020 г.

ELECTRODYNAMIC DESIGN OF RADIATING MICROWAVE TRANSISTOR AMPLIFIER

Kurushin A.A.

For design of radiating Microwave Transistor Amplifiers, it is proposed to use the electrodynamic method of calculation the transistor is represented by Four-Port Scheme. This enables the design with the losses by radiation and taking into account the connection between the individual fragments arbitrary shape Structures.

Keywords: microwave transistor amplifier, stability, matching, electrodynamic calculation, FEKO

Курушин Александр Александрович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры радиотехнических приборов и антенных систем ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"», Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: kurushin@mail.ru

Kurushin Aleksandr Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russian Federation, Moscow.

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.032.26

АТАКИ НА АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ АУТЕНТИФИКАЦИИ НА НЕЙРОСЕТЕВЫХ КЛАССИФИКАТОРАХ

© 2020 *Бабичева М.В., Василенко Д.В.*

Проанализированы условия проведения 2 видов атак на автоматизированные системы аутентификации, основанные на нейросетевых классификаторах. Рассмотрены возможности генерации изображений, распознаваемых классификаторами некорректно с разной степенью вероятности. Написана программа на языке Python 3.6.5 для генерации фальшивых изображений методами градиентного спуска с добавлением статического белого шума и добавлением ограниченного количества искажений. Полученные изображения протестированы на 12-ти ресурсах для распознавания и классификации изображений нейронными сетями. Проведен сравнительный анализ трех алгоритмов для введения в заблуждение классификаторов на основе нейронных сверточных сетей.

Ключевые слова: автоматизированные системы аутентификации, глубокие нейронные сети, классификаторы на нейронные сети, распознавание изображений, градиентный спуск, генетический алгоритм.

Введение. Применение нейросетевых классификаторов в автоматизированных системах аутентификации позволяет повысить их защищенность, так как процесс установления истинности пользователя, имеющего доступ к системе, осуществляется постоянно. Однако, сами алгоритмы обучения предоставляют возможность генерирования изображений, которые классификаторы определяют некорректно [1]. Достаточно заново обучить нейронную сеть, но используя обратное распространение ошибки не для изменения весовых коэффициентов, а для редактирования точек изображения. Сгенерированные фальшивые изображения будут некорректно классифицироваться нейронной сетью, которая их создала. Однако можно ли ввести в заблуждение другие нейронные классификаторы, разработанные ведущими компаниями в области распознавания образов, подав на них подобные изображения? Оценить возможность проведения атак типа «белый ящик» (когда атакующему известна архитектура нейронной сети) и «черный ящик» (когда архитектура распознающей сети неизвестна). Этой проблеме посвящена данная работа. Ранее подобных исследований не проводилось.

Постановка задачи. Необходимо разработать программу, которая модифицирует предварительно обученную модель нейронной сети таким образом, что полученное изображение будет распознаваться как другой предмет, хотя визуально останется прежним. Программа должна иметь возможность регулирования количества итераций преобразования, а, следовательно, количества измененных пикселей. Исходные и модифицированные изображения подать на известные классификаторы, которые компании предоставляют для свободного пользования в сети Интернет. Одновременно для сравнения подать изображения, модифицированные при помощи дифференциального генетического алгоритма [2]. Сделать выводы о возможности применения алгоритма градиентного спуска с искажениями для введения в заблуждение

известных нейросетевых классификаторов и уязвимостях автоматизированных систем аутентификации к данному виду атак.

Алгоритмы для модификации изображений. Упомянутые выше алгоритмы в литературных источниках имеют различные названия и модификации, поэтому авторы воспользовались собственной классификацией [1].

Для создания фальшивых изображений использовались:

- градиентный спуск с добавлением статического белого шума по всему изображению (Gradient Descent with static White Noise GDWN);
- градиентный спуск с добавлением ограниченного количества искажающих данных (Gradient Descent with a limited amount of Distortion Data GDDD);
- заплатка на основе дифференциального генетического алгоритма (Differential Genetic Algorithm Patch DEAP);

Последний алгоритм не был реализован в программе, использовалась заплатка, описанная в работе [3], которая неплохо зарекомендовала себя в предыдущих исследованиях.

Разработка программного модуля. Для классификации использовалась предварительно обученная, на наборе данных MNIST в ImageNet, нейронная сеть Mobile Net Keras с 'channels_first' форматом данных (каналы, высота, ширина), используемая совместно с библиотеками Keras 2.1.5 и TensorFlow 2.2.2 [4]. Данная сеть обнаруживает 1000 различных типов объектов. Модель MobileNet была выбрана, так как она использует меньше оперативной памяти, чем подобные решения Keras и других производителей. Размер ввода по умолчанию для этой модели - 224x224.

Эксперименты проводились на персональном компьютере с процессором Intel®, Pentium®, CPU G6300 2.7 GHz и видеоадаптером NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti. Процесс создания фальшивого изображения представлен на рисунке 1.

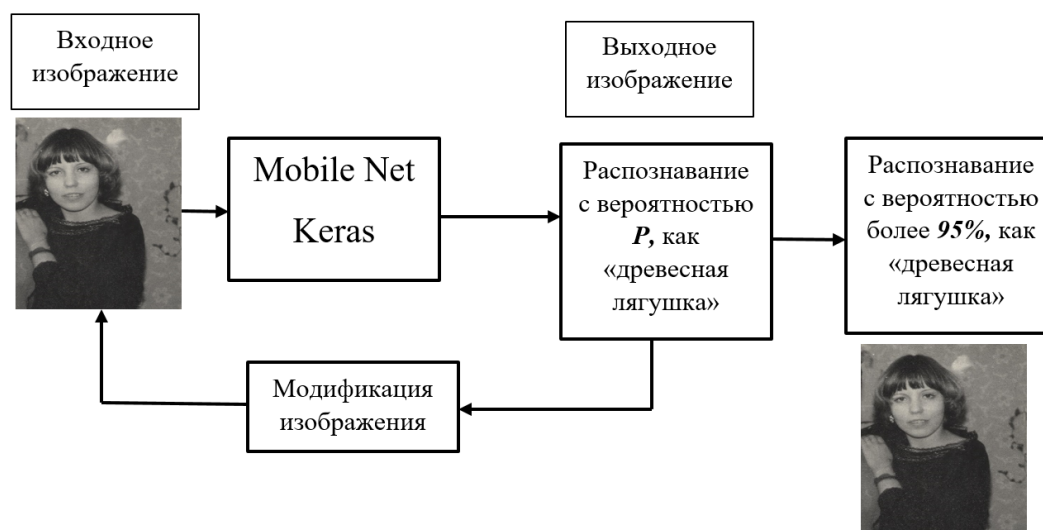


Рис. 1. При генерации фальшивого изображения методом обратного распространения ошибки, пиксели изменяются так, чтобы результат стал немного ближе к нужному ответу на каждой итерации

Фотография, которую сеть классифицирует как «девушка» с вероятностью 95%, после модификации алгоритмами GDWN и GDDD должна классифицироваться, как «древесная лягушка», с не менее чем с 95% вероятностью. Изображение для классификации должно быть похожим на исходное изображение не только на глаз, но и

по значению хеш-суммы (максимальная разница в 2 бита с использованием р-хэша). Сгенерированные изображения не обязательно должны быть близки к базовому изображению для работы в локальных системах, но для классификаторов, используемых в компьютерных сетях, это может иметь значение, так как при загрузке проверяются хеш-суммы. Вероятность, с которой сеть будет распознавать девушку как лягушку можно настраивать в программе.

В идеале можно получить уверенность 99% и разницу в 0 бит. Однако позволяя регулировать пиксели без каких-либо ограничений, изменения в изображении могут стать достаточно значительными, и человек сможет их увидеть, как обесцвеченные или волнистые области. Чтобы предотвратить подобные искажения, в алгоритм добавлено ограничение: ни один пиксель в фальшивом изображении не может быть изменен более чем на 0,01% от исходного. Это условие настраивается в программе переменными `max_change_above` и `max_change_below`.

Предмет, за который принимает девушку нейронная сеть можно изменять, изменяя номер изображения для обучения в базе MNIST. Для древесной лягушки это 31, для кольчуги – 52, для банана – 63, для тостера - 859. Тестовое изображение может быть цветным или в оттенках серого, в формате `tif`, `png` или `jpeg`. На изображении должен быть один предмет, если предметов больше одного, то классификация производится некорректно.

Обработка изображений и распознавание сетью MobileNet. Сначала на обученную сеть подается исходное изображение, которое распознается как «девушка», с вероятностью 99,97521%. Затем производится обработка изображения по алгоритму GDWN, то есть накладывается белый шум, а затем значения яркости пикселей корректируются градиентным спуском, пока не получится нужный результат (Рис. 2). На второй фотографии визуально девушка, но сеть MobileNet, распознает ее как древесную лягушку с вероятностью 99,965894%.



Рис. 2. Слева – исходное изображение, распознаваемое нейронной сетью MobileNet, как «девушка», в центре – сгенерированное алгоритмом GDWN изображение, распознаваемое нейронной сетью, как «древесная лягушка», справа – процесс преобразования изображения

На рисунке видно, что полученное фальсифицированное изображение немного зашумлено, появились артефакты характерные для алгоритма GDWN. Затем производится обработка изображения по алгоритму GDDD, то есть не накладывается белый шум, а Ketas рассчитывает градиент на основе входного изображения и текущего предсказанного класса, в переменную `model_input_layer` возвращается изображение, которое модифицируется на каждой итерации. Максимальное значение модифицируемых пикселей, ограничено 0.01%, как и в предыдущем случае. Результаты

преобразования в целом аналогичны преобразованиям алгоритмом GDWN, получалось меньше артефактов на выходных изображениях.

Когда изображение прогонялось через нейронную сеть для модификации несколько раз, количество итераций модификации сокращалось нелинейно. Усредненные результаты эксперимента представлены на рисунке 3.

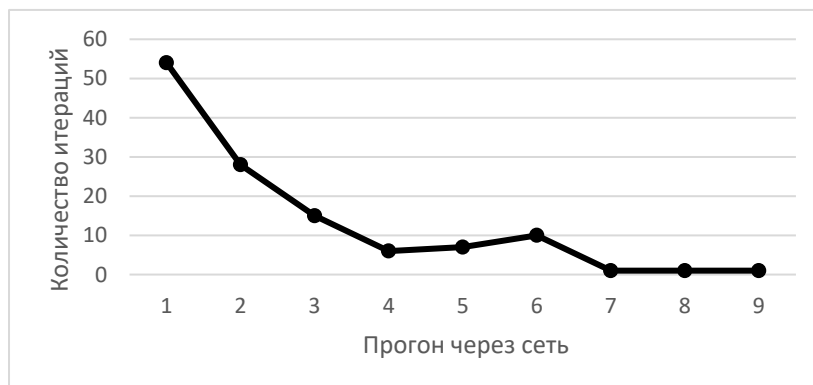


Рис. 3. Количество итераций алгоритма GDDD в зависимости от количества прогонов через сеть MobileNet

Видно, что после 7-го прогона модификации не происходят, поскольку достигнуто пороговое значение 0.01%. При выставлении других пороговых значений, выходные изображения в итоге распознаются сетью MobileNet как целевые с соответствующей меньшей вероятностью, при неизменном внешнем виде.

Изображение заплатки для модификации алгоритмом DEAP было взято из работы «Заплата для фальсификации», модифицированное изображение должно распознаваться как «тостер» [3]. Заплата накладывалась на исходное изображение в различных местах и с разными размерами (Рис.4).



Рис. 4. Слева – заплатка для модификации изображения в класс «тостер», справа – исходное изображение с наложенной заплаткой различных размеров

Место наклеивания влияло на результаты распознавания только если заплатка наклеивалась непосредственно на лицо, при этом вероятность распознавания девушки, как «тостер» резко приближалась к 100%. Во всех остальных случаях наблюдалось увеличение процента неправильного распознавания при увеличении размеров заплатки (Рис.5).

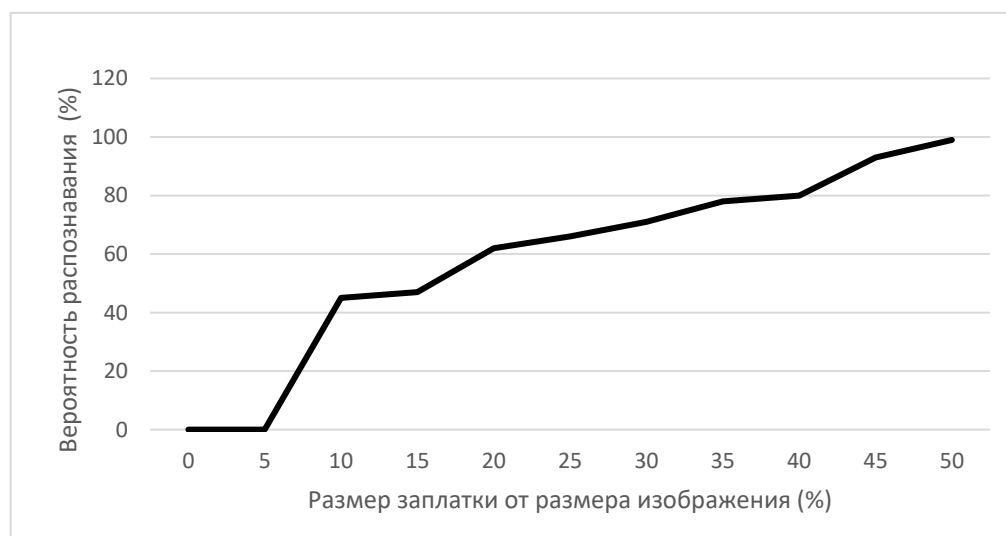


Рис. 5. Зависимость результатов распознавания тестового изображения как «тостер» в зависимости от размера заплатки по отношению к размеру изображения, сеть MobileNet

Результаты распознавания сфальсифицированных изображений сторонними ресурсами. Для исследования распознавания фальсифицированных изображений сторонними ресурсами были выбраны 12 on-line общедоступных сервисов для распознавания предметов и лиц, поиск по изображениям от Google и Яндекс. Два последних ресурса не удалось «обмануть», они уверенно распознавали все модифицированные изображения, как «девушка» (Рис.6).

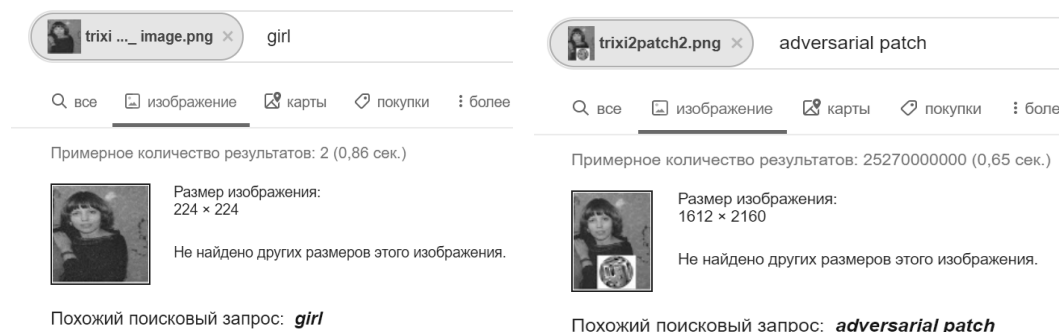


Рис. 6. Google распознает все модифицированные изображения как «girl», кроме изображения с заплаткой

Поиск изображений Google распознавал изображения с заплаткой как «Adversarial patch», в то время как Яндекс распознавал, как «девушка». Это обусловлено различными подходами к выделению признаков для классификации и структурами нейронных слоев, а также небольшой популярностью данной тематики в российском секторе Интернета. Среди остальных доступных в Интернете 10 -ти сайтов по распознаванию лиц «обмануть» удалось только 3: Автоматическое генерирование подписей к фотографиям (<https://neuronus.com/instruments/>), распознавание образов Amazon /<https://imagga.com> и распознавание лиц <https://www.betafaceapi.com>). Результаты представлены на рисунках 7 и 8.



Рис. 7. Результаты распознавания, исходного и модифицированного алгоритмом GDWN изображений на сайте neuronus.com



Рис. 8. Результаты распознавания, исходного и модифицированного алгоритмами GDWN, DGAP и GDDD на сайте imgaga.com

<https://www.how-old.net> распознала модифицированное по алгоритмам GDWN и GDDD лицо как «девушка», но с меньшей вероятностью, чем немодифицированное изображение. На ресурс <https://primeyes.com> модифицированные изображения вообще не загружались, а изображение с заплаткой загрузилось, но распознано неправильно, как «человек с бородой и бакенбардами». В таблице 1 представлены результаты по всем протестированным ресурсам.

Таблица 1. Результаты распознавания модифицированных изображений на on-line ресурсах

№	Ресурс	GDWN	GDDD	DGAP
1	neuronus	Распозналось как «зеленая лягушка»	Распозналось как «зеленая лягушка»	Распозналось как «тостер»
2	imaggga	Распозналось как «кольчуга»	Распозналось как «зеленая лягушка»	Распозналось как «тостер»
3	tineye	Не распозналось	Не распозналось	Распозналось как «Adversonal patch»
4	images.google	Распозналось как «девушка»	Распозналось как «девушка»	Распозналось как «Adversonal patch»
5	yandex/images	Распозналось как «девушка»	Распозналось как «девушка»	Распозналось как «девушка»
6	betaface	Распозналось неправильно	Распозналось неправильно	Распозналось неправильно
7	how-old.net	Распозналось как «девушка» с вероятностью 27%	Распозналось как «девушка» с вероятностью 31%	Не распозналось
8	pimeyes	Не распозналось как лицо	Не распозналось как лицо	Распозналось неправильно
9	pic.sogou	Распозналось как «девушка»	Распозналось как «девушка»	Распозналось как «девушка»
10	bing	Распозналось как «девушка»	Распозналось как «девушка»	Распозналось как «девушка»
11	kairos	Распозналось как «девушка»	Распозналось как «девушка»	Не распозналось как человек
12	aidemos.microsoft	Распозналось как «девушка»	Распозналось как «девушка»	Не загружалось

Поскольку все представленные ресурсы работают по разным сценариям и решают разные задачи (поиск похожих изображений, распознавание лиц, распознавание изображений) то сравнительный анализ можно проводить довольно приблизительно. Главным критерием являлось, распознает ли нейронная сеть изображение как «девушка» или хотя бы как «человек». Сервисы, предназначенные для поиска похожих изображений, оказалось «обмануть» труднее, чем сервисы для распознавания лиц. Легче всего «обманывались» сервисы для классификации изображений.

Выводы. Сгенерированные нейронной сетью фальсифицированные изображения распознаются неправильно той сетью, которой они были сгенерированы с вероятностью 99% (при этом в процессе модификации эту вероятность можно менять). На сторонних нейросетевых ресурсах, работающих как нейросетевые классификаторы, они так же распознаются неправильно в 90% случаев.

Из 5-ти протестированных сервисов по поиску похожих изображений «обмануть» не удалось ни один. Сервисы для распознавания лиц в большинстве случаев не распознают модифицированные изображения как лицо человека или распознают неправильно, например, как мужчину или ребенка. Поскольку распознавание изображений находит все более широкое применение в автоматизированных системах аутентификации и безопасности, разработчикам стоит тестировать системы на возможность подобного «обмана» со стороны злоумышленников. Необходимо держать в секрете архитектуру используемых нейронных сетей, поскольку, как показали эксперименты, злоумышленник может сгенерировать фальшивые изображения, используя аналогичную модель. При наложении фальсифицирующей заплатки наличие знаний о структуре модели необязательны, однако в этом случае процесс

верификации должен быть полностью автоматизирован, поскольку заплатка в отличие от машинного зрения, хорошо различима человеческим. Целесообразно дополнять автоматизированные системы аутентификации инструментами поиска подобных уязвимостей, разработка таких инструментов является перспективной задачей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабичева М. В. Атаки на нейросетевые классификаторы / М. В. Бабичева // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 51-55.
2. Stefan S. Optimizing a production process by a neural network/genetic algorithm approach / S. Stefan // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2016. – Vol. 9, № 6. – P. 681-689.
3. Adversarial Patch / T. B. Brown, D. Mane, A. Roy [et al.]. – Текст : электронный. – URL: <https://arxiv.org/abs/1712.09665> (дата обращения: 28.11.2019).
4. Keras documentation. Applications : [сайт]. – URL: <https://keras.io/applications/> (дата обращения: 29.11.2019). – Текст : электронный.

Поступила в редакцию 31.01.2020 г.

ATTACKS TO AUTOMATED AUTHENTICATION SYSTEMS ON NEURAL NETWORK CLASSIFIERS

Babicheva M.V., Vasilenko D.V.

The conditions for 2 types of attacks on automated authentication systems based on neural network classifiers are analyzed. The possibilities of fake images generating with varying degrees of recognition probability are considered. A program in Python 3.6.5 for generating fake images using gradient descent methods with the addition of static white noise and the addition of a limited amount of distortion was written. The resulting images were tested on 12 resources for recognition and classification of images by neural networks. A comparative analysis of three algorithms for misleading classifiers based on neural convolutional networks is carried out.

Keywords: automated authentication systems, deep neural networks, classifiers on neural networks, image recognition, gradient descent, genetic algorithm.

Бабичева Маргарита Вадимовна

ст. преподаватель кафедры радиопизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, Донецк.
E-mail: m.v.babicheva60@gmail.com

Babicheva Margarita Vadimovna

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

Василенко Дмитрий Владимирович

студент кафедры радиопизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, Донецк.
E-mail: Dmitry170399@ya.ru

Vasilenko Dmitry Vladimirovich

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

УДК 004.031.6

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РАДИОМОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ РАДИОСИСТЕМЫ

© 2020 Рушечников Я.И., Данилов В.В.

В настоящей работе предлагаются методы обработки данных на основе программно-определяемой радиосистемы, позволяющей автоматизировать поиск технических каналов утечки информации и побочных электромагнитных излучений.

Ключевые слова: программно-определяемая радиосистема (SDR), радиомониторинг, обработка спектра радиочастот, обработка данных, побочные электромагнитные излучения и наводки (ПЭМИН).

Введение. Программно-определяемые радиосистемы (далее SDR), представляют набор программных и специальных аппаратных средств, которые позволяют решать круг задач анализа взаимодействия радиоизлучений в широком диапазоне частот, некоторые SDR системы могут использоваться для решения задач мониторинга спектра радиочастот. Данный класс устройств, благодаря возможностям программного управления, реализует функции физического уровня, что обеспечивает возможность обработки различных типов сигналов без изменения аппаратной части принимающего устройства.

В данной статье рассмотрено применение платформы HackRF One и возможностей языка Python по обработке и визуализации данных экспериментального наблюдения радиоизлучений.

Платформа HackRF One [1], это программно-аппаратная SDR платформа, способная передавать и принимать радиосигналы на частотах от 1 МГц до 6 ГГц, которая может быть использована как в качестве периферийного устройства (ввода/вывода) так и программной автономной работы. Кроме того, в платформе предусмотрена возможность тестирования и разработки протоколов и технологий радиообмена, проверки протоколов на соответствие, а так же решение задач радиомониторинга.

Основные характеристики платформы: полудуплексный приём и передача; рабочие частоты от 1 МГц до 6000 МГц; частоты дискретизации аналого-цифрового преобразования — от 2 до 20 мегасемплов (Msps) в секунду; разрешение АЦП — 8 бит; открытая программная платформа с гибкой моделью взаимодействия. Приемник: максимальная мощность принимаемого сигнала составляет -5 дБм (dbm); теоретически платформа может работать и безопасно принимать до 10 дБм при программно-отключённом входном усилителе, тем не менее, фирма-разработчик рекомендует использовать аттенюатор. На рис. 1 изображено панель приёмника с выводами тактирования.

Платформа HackRF One имеет два вывода CLKIN и CLKOUT. На вывод CLKOUT самим приёмником выдаётся тактовый сигнал с частотой 10 МГц с напряжением от 0 до 3 В, предназначенную для нагрузки с высоким импедансом. Порт CLKIN на Hack RF One является входом с высоким импедансом, который ожидает прямоугольную волну от 0 В до 3 В на частоте 10 МГц. Эти выводы нужны для синхронизации двух независимых и параллельно работающих HackRF.

Дополнительные коммуникационные возможности: помимо шины USB для связи с компьютером и выводов CLKIN и CLKOUT для связи двух приёмников, платформа имеет такие коммуникационные интерфейсы как: I2S, SPI, I2C, UART, GPIO, SDIO. Набор интерфейсов позволяет использовать HackRF в связке не только с компьютером, но и с различными внешними микроконтроллерами, а так же в составе АСУТП или систем SOC (security operation center) [1].



Рис. 1. Внешний вид SDR приёмника

Постановка задачи. Базовые функции SDR приёмников – плавное переключение между частотами сигналов, изменение типа модуляции для корректного декодирования, запись сигнала и всех его составляющих в заданной полосе частот, но этих функций для системы радиомониторинга недостаточно. Проблема состоит в том, что плавное переключение между частотами занимает большое количество времени (к примеру, для того, чтобы просканировать в таком режиме частотный диапазон устройством RTL SDR (24...1766 МГц) понадобится более 25 минут). Из-за такого продолжительного времени деятельность по контролю радиообстановки, поиск и обнаружение законных и незаконных радиопередатчиков, будет иметь не высокую эффективность в силу того, что современные передающие системы могут транслировать информацию в сжатом виде и в короткие промежутки времени. Кроме того, если приёмник сможет быстро сканировать заданный диапазон частот, то возникает проблема обработки большого количества информации на скорости, близкой к реальному времени.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование возможностей быстрого сканирования в SDR системах, а также выработка оптимального алгоритма обработки данных от системы.

Особенности устройства HackRF One, как SDR платформы заключается в том, что её возможности развиваются не только за счёт того, что пишется специальное программное обеспечение, но и благодаря обновлению микропрограммы самого устройства. Благодаря такой возможности устройство приобретает новые функции, которые перспективно были в него заложены. Таким же образом развилась и возможность быстрого сканирования, которая позволяет охватить частотный диапазон от 1 до 6000 МГц менее чем за одну секунду [2]. Данная способность порождает несколько проблем, первая состоит в том, что по умолчанию приёмник получает снимок радиочастотной обстановки на весь свой диапазон, но с шагом перестройки в 1 МГц, что составляет 5999 выборок. Этот факт не позволит обнаружить частоты, находящиеся внутри промежутка 1 МГц. Вторая проблема состоит в том, что при увеличении разрешающей способности сканирования (шага перестройки) приёмника, объём данных растёт вдвоекратно на каждом шаге, что ведёт к тому, что потребуются дополнительные аппаратные ресурсы компьютера, к которому подключается SDR система.

В таблице 1 представлены данные зависимости количества элементов результирующей выборки от ширины окна просмотра программной радиосистемы при быстром сканировании.

Таблица 1. Зависимость количества отсчётов от ширины окна при сканировании диапазона от 1 до 6000 МГц

Ширина окна (Гц)	Количество отсчётов
1047552	6000
523776	13200
261888	22800
130944	46800
65472	92400
32736	183600
16368	368400

Из таблицы 1 видна обратная зависимость, при которой чем уже используется окно для просмотра, тем больше данных приёмник сгенерирует в результирующей выборке, а это в свою очередь может повлиять на скорость обработки и визуализации полученной информации.

Форматы данных и их обработка. Как было сказано ранее SDR платформа HackRF One имеет следующие интерфейсы, по которым она может обмениваться данными о сканировании: I2S, SPI, I2C, UART, SDIO, USB. В качестве интерфейса для получения данных о сканировании был выбран USB, так как в задачах исследования не стояло внедрение SDR платформы в АСУТП посредством микроконтроллерных интерфейсов. Получение данных от платформы может производиться в нескольких форматах: либо это будет поток двоичных данных, либо CSV файл со следующими полями (дата, время, верхняя и нижняя части диапазона, ширина диапазона, а далее все значения обнаруженных мощностей сигналов в данном диапазоне). Выборка данных в файле подобного формата представлена в таблице 2.

Таблица 2. Общий вид необработанных данных, принятых от SDR системы

date	time	hz_low (КГц)	hz_high (КГц)	Width (Гц)	num_samples	dB	dB	
2020-03-09	21:28:19	1000	6000000	16286	1228	-86.46	-72.89	...

Как видно из таблицы 2 по полю width ширина окна составляет 16286 Гц, что позволит в перспективе фиксировать самые узкополосные радиосигналы.

На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма программы, которая на основе двух однократных измерений (в зоне действия ПЭМИН и вне его) визуализирует разностную картину радиообстановки в контролируемом диапазоне частот.

В качестве технологии по накоплению, обработке и визуализации данных был выбран язык программирования Python с набором математических библиотек (pandas, numpy, matplotlib, scipy).

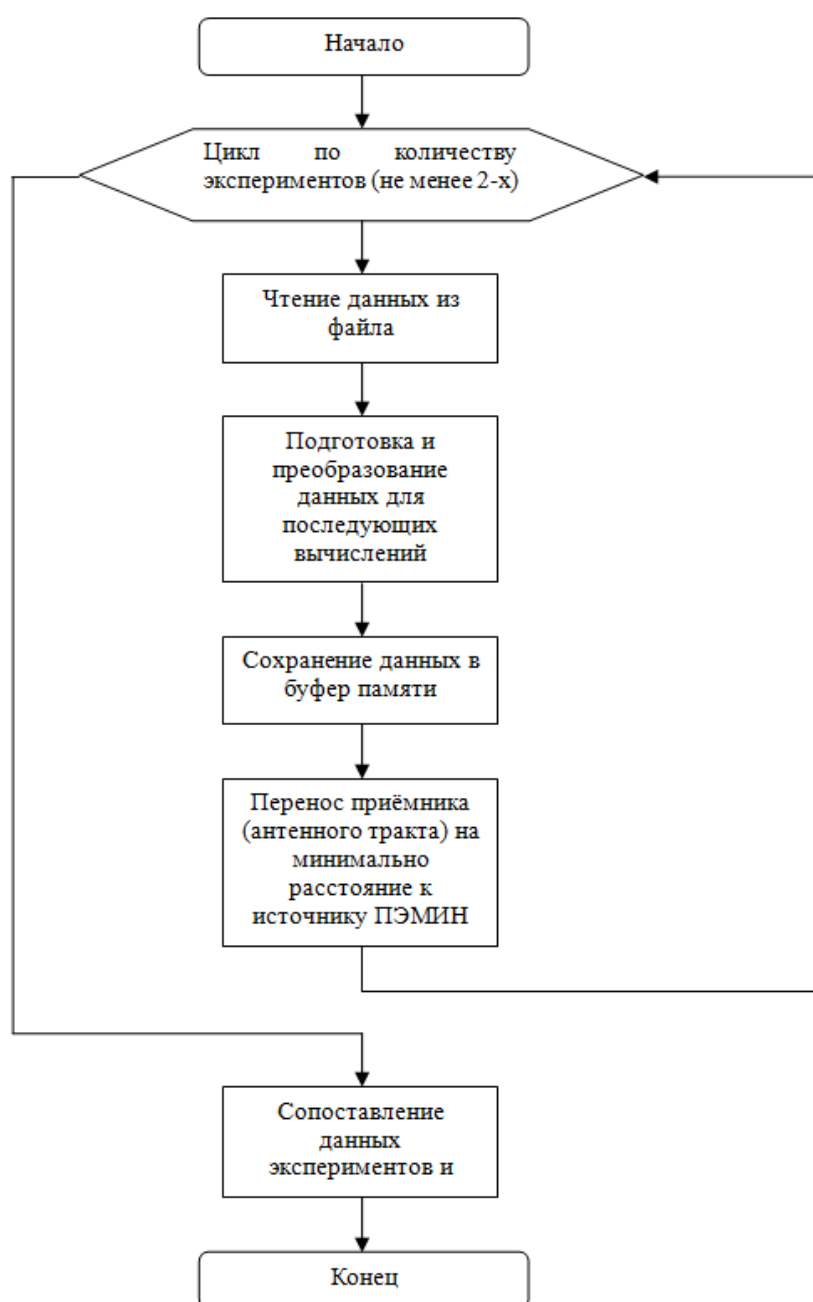


Рис. 2. Блок-схема алгоритма реализации системы радиомониторинга по двум состояниям

Результаты работы программы. Для получения наиболее точной картины радиообстановки и поиска частот вещания ПЭМИН была выбрана следующая методика измерения: сначала производится снимок радиообстановки вне зоны действия ПЭМИН вычислительной техники, далее приёмник с антенным трактом переносится ближе к вычислительной технике, и эксперимент повторялся. На графике дополнительно визуализируется значение среднего по измерениям (две параллельные линии), и чем оно больше, тем больше разница в радиообстановке при измерениях.

Как видно из графика (рис. 3) на некоторых частотах есть явное превышение одного графика над другим. Можно провести ещё одно измерение на интересующих

участках для получения наиболее явной разностной картины. Результат этого измерения представлен на рис. 4.

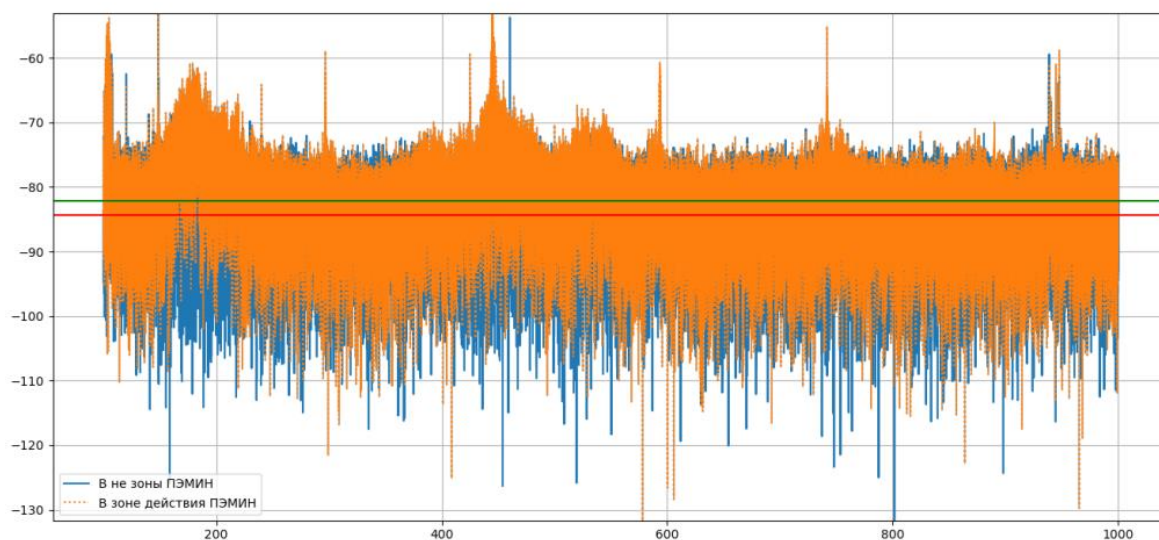


Рис. 3. Снимок радиообстановки от 1 до 1000 МГц

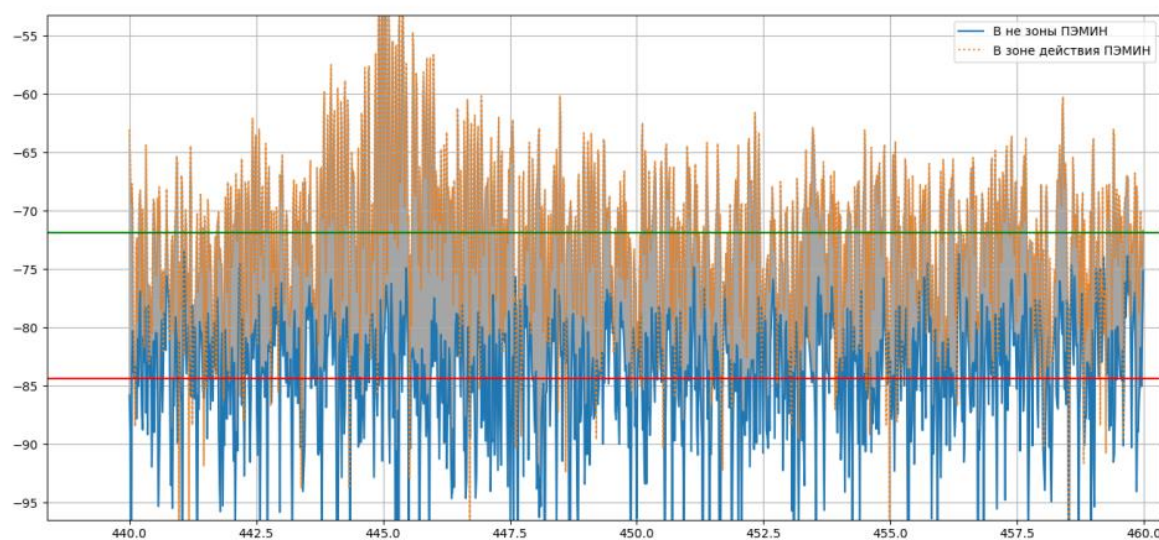


Рис. 4. Подробный список радиообстановки от 440 до 460 МГц

Как видно по разностной картине (рис. 3, рис. 4) можно судить о присутствии частот, на которых во время эксперимента было обнаружено несоответствие относительной мощности вещания. Следовательно, к данным частотным участкам можно применять дальнейшие мероприятия по анализу и распознаванию сигналов.

Выводы. В данной работе рассмотрена возможность механизма быстрого сканирования при помощи SDR системы, который позволяет визуально строить разностную картину между сканированием в зоне действия ПЭМИН и за её пределами. Описанный прототип можно использовать как механизм поиска радиозакладных устройств по корреляции радиообстановки в контролируемом помещении и вне его. Так же данный программный прототип может быть использован как один из функциональных блоков многофункциональной системы радиомониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. HackRF // GREAT SCOTT GADGETS : [сайт]. – URL: <http://greatscottgadgets.com/hackrf/> (дата обращения: 01.03.2020). – Текст : электронный.
2. Ossmann M. What's on the Wireless? Automating RF Signal Identification : Great Scott Gadgets Technical Report 2017-1 / M. Ossmann, D. Spill. – Изображение (движущееся ; двухмерное) : видео // YuoTube^{RU}. – URL: https://www.youtube.com/watch?v=XNcGhnY_0oI (дата обращения: 03.03.2020).

Поступила в редакцию 21.03.2020 г.

INFORMATION TECHNOLOGY OF RADIOMONITORING BASED ON SOFTWARE-DETERMINED RADIO

Rushechnicov Y.I., Danilov V.V.

In this paper, we propose data processing methods based on a software-defined radio system that automates the search for technical channels of information leakage and spurious electromagnetic radiation.

Keywords: software-defined radio (SDR), radio monitoring, spectrum processing of radio frequencies, data processing, TEMPEST (сокращение от Transient Electromagnetic Pulse Emanation Standard).

Рушечников Ярослав Иванович

аспирант кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: yaroslavrushechnicov@gmail.com

Rshechnicov Yaroslav Ivanovich

Postgraduate student at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

УДК 004.934

АНАЛИЗ ИНФОРМАТИВНОСТИ УЧАСТКОВ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ В УСЛОВИЯХ ШУМА

© 2020 Шарий Т.В.

В статье предлагается метод автоматического обнаружения голосовой активности в зашумленных звуковых сигналах, опирающийся на эффективные модели машинного обучения. Описана общая схема и робастный алгоритм расчета вектора признаков звукового фрейма на основе амплитудно-временного, спектрального и кепстрального анализа сигнала. Приведены результаты экспериментов по отбору и распознаванию признаков с помощью машин опорных векторов и ансамблей деревьев решений.

Ключевые слова: VAD; гармонические спектральные признаки; PNCC; машинное обучение.

Введение. На протяжении последних десятилетий многие исследовательские группы по всему миру занимаются важнейшей научно-практической задачей компьютерного распознавания человеческой речи. Результатом решения данной задачи являются системы синтеза (TTS, Text-to-Speech) и распознавания (ASR, Automatic Speech Recognition) речи [1-4], образующие фундамент для построения современного полноценного голосового интерфейса. В конце 2010-х годов популярность систем и устройств с голосовым интерфейсом продолжала расти. С приходом смартфонов в жизнь людей речевые технологии уже должны быть доступны в любом месте и любой ситуации. С голосовым интерфейсом связаны такие востребованные задачи, как: идентификация диктора по ключевым фрагментам речи; поиск ключевых слов и фраз в аудиофайлах и видеофайлах; дополнительная обработка речевого сигнала в слуховых аппаратах для людей с проблемами слуха с целью выделения полезного сигнала и подавления нежелательных шумов и помех. В частности, существенной и актуальной проблемой, связанной с автоматическим распознаванием речи, является искажение речевого сигнала шумами различной природы [5-7]. Современные системы распознавания речи обучаются на основе речевых данных, записанных разными конкретными дикторами и в разных конкретных условиях. Робастные системы призваны распознавать речь в условиях, когда тестовые речевые данные отличаются от обучающих. Однако робастности систем препятствуют многие факторы. Микрофон неизбежно искажает исходный речевой сигнал (система распознавания, таким образом, имеет дело со сверткой исходного сигнала с импульсной характеристикой микрофона). Кроме того, для любых помещений, в которых производится запись звука, характерен в той или иной степени эффект реверберации (наложение отраженного звука с определенной задержкой во времени), приводящий, в свою очередь, к маскировке важных частот. Наконец, важнейшим фактором, затрудняющим распознавание речи, является наличие аддитивного стационарного и нестационарного шума, непосредственно влияющего на спектр речевого сигнала.

Таким образом, независимо от сферы применения речевых технологий, разработчики сталкиваются с одной и той же задачей детектирования полезного речевого сигнала в общем звуковом потоке (Voice Activity Detection, VAD) [8-10], которая в условиях наличия помех становится весьма нетривиальной. Здесь возникает необходимость в исследовании различных параметров (признаков, или фич, features) звуковых сигналов, наиболее инвариантных к шумам при детектировании речи.

Постановка задачи. Целью данной работы является повышение качества автоматического обнаружения речевой активности в звуковом сигнале на основе анализа множества его параметров (дескрипторов). Для этого необходимо выполнить визуальный разведочный и более глубокий статистический анализ как можно большего числа звуковых характеристик: амплитудно-временных, спектральных, кепстральных. Процесс анализа должен обеспечиваться информационной технологией, включающей процессы загрузки и сохранения речевых данных, вычисления дескрипторов, визуализации результатов в виде графиков и таблиц, аугментации речи путем искусственного добавления помех и искажения звукового сигнала.

Общая схема выделения информативных участков речи. На рис.1 приведена общая схема выделения информативных участков речи и обнаружения голосовой активности в аудиосигнале.

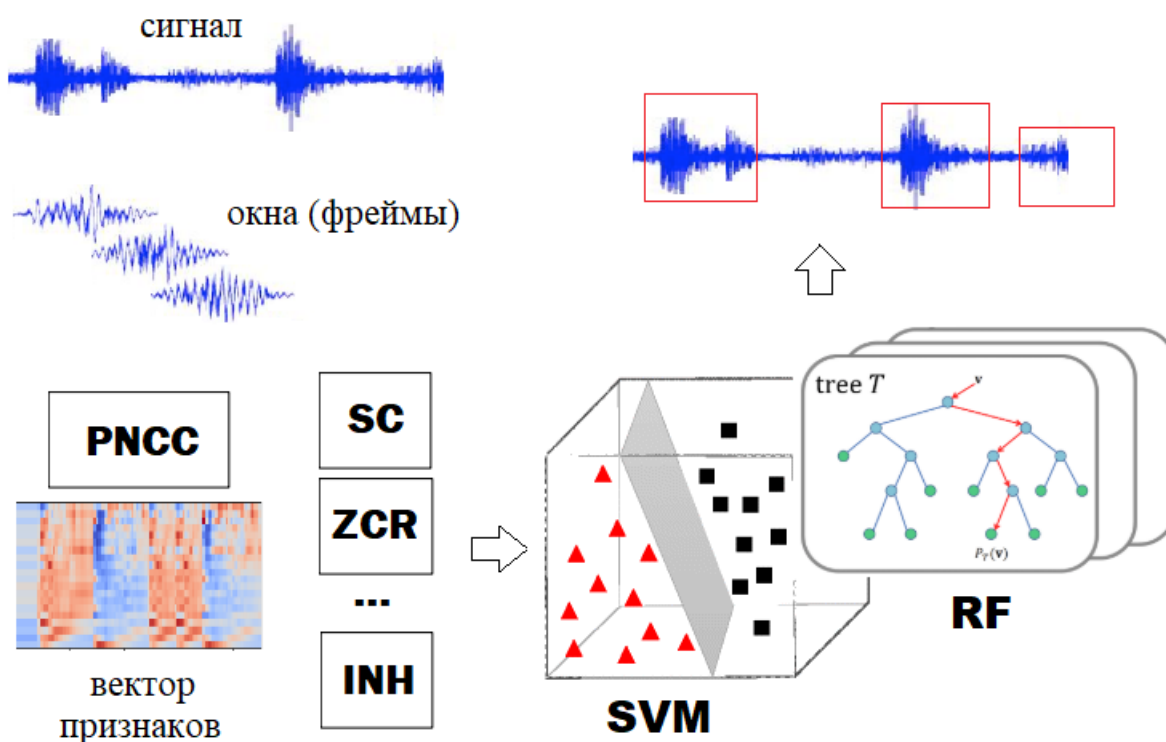


Рис. 1. Общая схема выделения информативных участков речи и обнаружения голосовой активности

Процедура извлечения всех характеристик звука производится в окнах длительности 32 мс с перекрытием 10 мс, в которых блок сигнала взвешивается оконной функцией Блэкмена. Перед этим звук пропускается через высокочастотный preemphasis-фильтр для усиления определенных частот, важных с точки зрения восприятия звука человеком. Во взвешенных фреймах вычисляется ряд звуковых дескрипторов. Первый тип дескрипторов – это амплитудно-временные и кепстральные признаки, вычисляемые по самому робастному из современных алгоритмов параметризации – PNCC. Второй тип дескрипторов – довольно большой набор спектральных, темпоральных и гармонических дескрипторов, активно применявшихся до этого в задачах извлечения музыкальной информации (MIR, Music Information Retrieval). Все характеристики образуют векторы признаков, которыми оперируют статистические анализаторы и модели-классификаторы на этапе обнаружения голосовой активности и на этапе обучения.

Финальным шагом является применение ансамбля деревьев принятия решений и многослойного персептрона для бинарной классификации звуков: «речь – не речь». Отбор наиболее значимых признаков производится заранее по алгоритму рекурсивного исключения признаков с помощью машин опорных векторов. Для хранения всех вспомогательных и промежуточных данных используются json- и csv-файлы.

Зашумленный речевой сигнал загружается из аудиофайла любого из самых популярных на сегодняшний день форматов (MP3, OGG или WAV) либо записывается с микрофона и представляет собой дискретный набор отсчетов. Файлы формата MP3 и OGG предварительно декодируются в формат импульсно-кодовой модуляции (PCM, Pulse Code Modulation). Все сигналы приводятся к единой частоте дискретизации, равной 16 кГц; количество бит на отсчет – ко значению 16.

Параметризация звукового сигнала. Вектор признаков аудиосигнала включает амплитудно-временные характеристики, спектральные и кепстральные дескрипторы.

Первая группа признаков вычисляется на основе уровнеграммы сигнала. Основными амплитудно-временными параметрами сигнала являются: 1) энергия участка; 2) энтропия участка сигнала; 3) частота перехода уровня сигнала через ноль; 4) длительность участка; 5) различные статистики вышеуказанных параметров (среднее, дисперсия, стандартное отклонение, медиана, мода и т.д.). Вторая группа – спектральные признаки: центроид, энтропия, дисперсия, крутизна. Самая важная группа дескрипторов – *гармонические дескрипторы* – базируются на гармонической структуре и особенностях амплитудных спектров речевых звуков. *Фундаментальная частота* – это интегральная характеристика спектра гармонического сигнала, связанная с восприятием человеком основного тона звуков и определяется методом максимального правдоподобия. Если данная частота выражена более-менее явно в спектре, то ее можно увидеть как локальный пик, имеющий кратные гармоники.

Шумность – это отношение энергии шумовой (негармонической) части спектра к общей энергии спектра. Значение шумности близко к 1 для чисто шумовых сигналов и к 0 для чисто гармонических:

$$HN = \frac{E_{noise}}{E_{total}}.$$

Разгармонизация спектра представляет собой степень расхождения спектра данного звука со спектром гармонического звука. Данная величина рассчитывается как средняя взвешенная (амплитудными коэффициентами) разность между частотами спектра и кратными фундаментальной частоте гармониками:

$$INH = \frac{2}{f_0} \frac{\sum_h |f(h) - h \cdot f_0| \cdot a^2(h)}{\sum_h a^2(h)},$$

где f_0 – фундаментальная частота; h – номер гармоники; $a(h)$ – амплитуда h -ой гармоники; $f(h)$ – частота h -ой гармоники.

Гармоническое спектральное отклонение характеризует среднее отклонение амплитудных пиков гармоник от спектральной огибающей:

$$HDEV = \frac{1}{H} \sum_h (a(h) - SE(h)),$$

где H – общее число анализируемых гармоник; $a(h)$ – амплитуда h -ой гармоники; $SE(h)$ – амплитуда спектральной огибающей, вычисленная на частоте $f(h)$.

Отношение энергии нечетных гармоник к энергии четных гармоник (Odd-To-Even Ratio) позволяет разграничивать звуки с доминантными нечетными гармониками и звуки с равным распределением энергии по гармоникам:

$$OER = \frac{\sum_{h=1;2:H} a^2(h)}{\sum_{h=2;2:H} a^2(h)}.$$

Величины *трехцветности* (*tristimulus*) были предложены для звуков как тембральный эквивалент цветовых атрибутов для изображений и восприятия изображений. Трехцветность – это набор из трех значений – отношений энергий, позволяющих хорошо описать первые гармоники спектра сигнала, которые являются более важными с точки зрения восприятия человеком:

$$T1 = \frac{a(1)}{\sum_h a(h)} \quad T2 = \frac{a(2) + a(3) + a(4)}{\sum_h a(h)} \quad T3 = \frac{\sum_{h=5:H} a(h)}{\sum_h a(h)}.$$

Кепстральные параметры фрейма рассчитываются по алгоритму PNCC (Power-normalized cepstral coefficients, нормализованные кепстральные коэффициенты) [2]. В данном алгоритме последовательно выполняются следующие блоки вычислений. В первом блоке вычисляются коэффициенты амплитудного спектра Фурье. Во втором блоке на вычисленный спектр накладывается набор из 40 перекрывающихся фильтров психоакустической шкалы гамматонов в диапазоне частот от 200 Гц до 6800 Гц. Эта широко используемая модель слуховых фильтров основана на фильтрации звуковых сигналов во внутреннем ухе человека. В третьем блоке производится асимметричное подавление шума. В четвертом блоке выполняется темпоральная маскировка спектра, после чего спектр возводится в степень $1/15$, и затем, в финальном блоке, производится нормализованное дискретное косинусное преобразование второго типа.

Таким образом, вектор признаков аудиофрейма завершается 12 коэффициентами PNCC, рассчитанными по описанному алгоритму.

Детектирование и удаление шума. В статье предлагается также производить дополнительную предварительную обработку звукового сигнала с целью обнаружения и удаления шумовых участков по следующему алгоритму. Во-первых, во многих звуковых файлах средний уровень энергии сигнала не равен 0. Этот дефект также называется «смещение DC-компоненты». Для компенсации данного дефекта из каждого отчета сигнала вычитается среднее значение энергии, посчитанное на всей длительности сигнала. Также удаляются фрагменты, в которых суммарное значение энергии не превосходит некоторый малый порог (т.е. очень тихие фрагменты). Во-вторых, часто аудиосигнал зашумлен. Для детектирования и удаления таких зашумленных участков производится оконный анализ с длительностью окна 16 мс (256 отсчетов при частоте дискретизации 16 кГц). В каждом окне считается дисперсия значений отсчетов:

$$\sigma^2(t) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x[t+n] - \bar{x})^2. \quad (1)$$

Как показали эксперименты, траектории параметра (1) вполне подходят для определения незначущих и шумовых участков во многих файлах. В работе отмечаются все фреймы, на которых дисперсия больше некоторого порога. Последовательности из более 30 подряд идущих таких окон полагаются шумовыми участками.

На рис.2 приведена иллюстрация работы вышеописанного алгоритма.

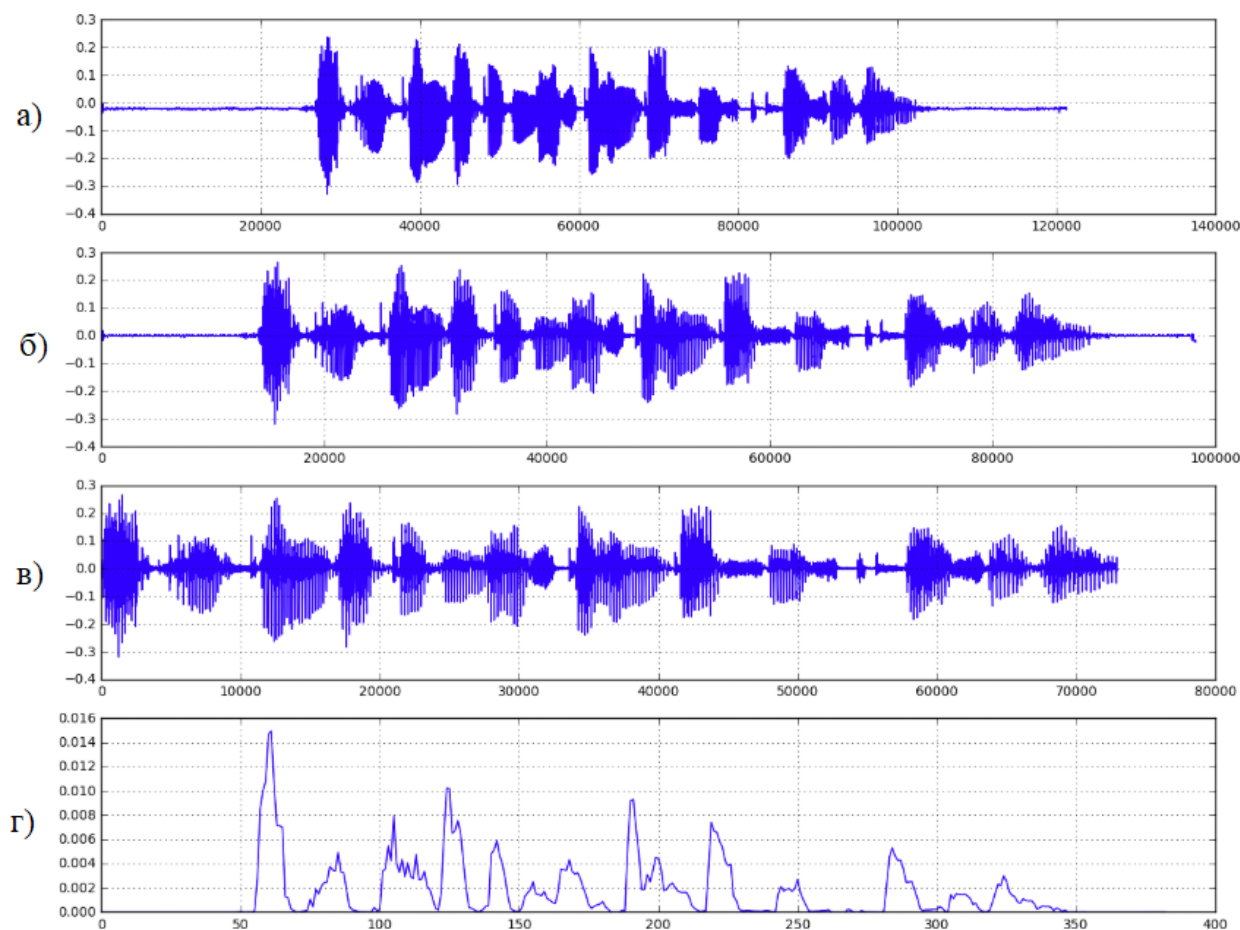


Рис. 2. Иллюстрация работы алгоритма обнаружения и удаления шума:

- а) исходный сигнал; б) сигнал после вычитания среднего и удаления наиболее тихих участков речи;
в) сигнал после удаления шумовых участков; г) траектория изменения параметра (1)

Описание эксперимента и анализ результатов. Для проведения качественного эксперимента в любом из направлений машинного обучения необходимо уделить максимум внимания набору данных. Аудиоданные разделяются на две категории: речевые фрагменты и различные фоновые фрагменты, которые будут анализироваться как в отдельности, так и путем наложения на речевой сигнал. Фоновые звуки были выкачаны из свободного аудиорепоzitория и включают самые разные образцы музыки, шумов и фона. Директория «Фоновые звуки» использовалась при экспериментах чаще всего. Она содержит такие звуки, как шум шоссе, обстановка торгового центра, шум морского прибоя, электроинструментов и т.д. В качестве речевых данных использовался речевой корпус VoxForge [11]. Данный корпус включает несколько языков. Для экспериментов был выбран русский язык. Русскоязычный набор репрезентативно представлен в речевом корпусе, хотя некоторые файлы, содержащиеся в речевом корпусе VoxForge, записаны довольно некачественно. Тем не менее, для сбора необходимой статистики число файлов с адекватным качеством записи и

диктовки вполне достаточно. Для скачивания репозитория был написан и применялся отдельный скрипт на языке Python.

В качестве базовых классификаторов выбраны многослойный персептрон и деревья принятия решений. Персептрон содержит три слоя, включающие 64 входных нейрона, 32 нейрона в скрытом слое и 1 нейрон в выходном слое. Скрытые слои имеют функцию активации ReLU, выходной слой – сигмоид.

Т.к. многослойный персептрон используется для классификации «речь / не речь», в качестве функции потерь применяется бинарная кросс-энтропия. Оптимизация значений весов при обучении нейронной сети производится по адаптивному алгоритму RMSProp [7].

Эксперимент проводился по следующей методологии: 1) производился подбор и наложение каждого из обучающих фоновых звуков в произвольных участках сигналов с речью; 2) выбирались произвольные участки с речью, произвольные участки шума, а также участки речи с наложенным шумом; 3) в этих отобранных фрагментах производился расчет всех необходимых амплитудно-временных, спектральных, гармонических дескрипторов, а также коэффициентов PNCC, для формирования вектора признаков; 4) формировались векторы признаков и сохранялись в csv-файле со специальным соглашением о наименовании: файл начинается с символа «s» (речь), или «b» (фон / шум), или «p» (зашумленная речь). В итоге получилось в общей сложности 13200 36-мерных записей; 5) производился анализ значимости признаков на основе случайного леса принятия решений, а также машин опорных векторов с помощью метода рекурсивного исключения признаков. Эти же модели машинного обучения применялись для анализа эффективности бинарной классификации звуковых фреймов по типу «речь / не речь».

Статистический разведочный анализ собранных данных показал, что часть признаков сильно коррелирует друг с другом (рис.3). В частности, корреляция параметра частоты перехода уровня сигнала через ноль и спектрального центроида проиллюстрирована на рис.4.

Dataset info		Variables types	
Number of variables	37	Numeric	33
Number of observations	13246	Categorical	0
Total Missing (%)	0.0%	Boolean	1
Total size in memory	3.7 MiB	Date	0
Average record size in memory	296.0 B	Text (Unique)	0
		Rejected	3
		Unsupported	0
Warnings			
• <u>hspread</u> is highly correlated with <u>hcentroid</u> ($p = 0.96106$) Rejected • <u>inharmoniccity</u> has 10313 / 77.9% zeros Zeros • <u>noiseness</u> is highly correlated with <u>centroid</u> ($p = 0.94542$) Rejected • <u>oer</u> has 10215 / 77.1% zeros Zeros • <u>rolloff</u> is highly correlated with <u>centroid</u> ($p = 0.926$) Rejected • <u>t1</u> has 10215 / 77.1% zeros Zeros • <u>hcentroid</u> has 10215 / 77.1% zeros Zeros • <u>t2</u> has 10215 / 77.1% zeros Zeros • <u>t3</u> has 10215 / 77.1% zeros Zeros			

Рис. 3. Фрагмент сводной статистики по выборке данных

После обработки входных данных дерево принятия решений показало точность при кросс-валидации 84%; ансамблирование деревьев позволило незначительно повысить точность распознавания речевых участков до 86-88%; машины опорных векторов (с линейным ядром) показали, в среднем, точность 78-80% на валидационной выборке. Похожие результаты показал и персептрон. При этом следует иметь ввиду, что размер выборки (как речи, так и фона) был недостаточно велик для полноценного анализа эффективности моделей. Тем не менее, показатели свидетельствуют о том, что выбранные в работе подходы довольно перспективны. На рис.5 приведены результаты эксперимента с рекурсивным исключением признаков на основе машин опорных векторов.

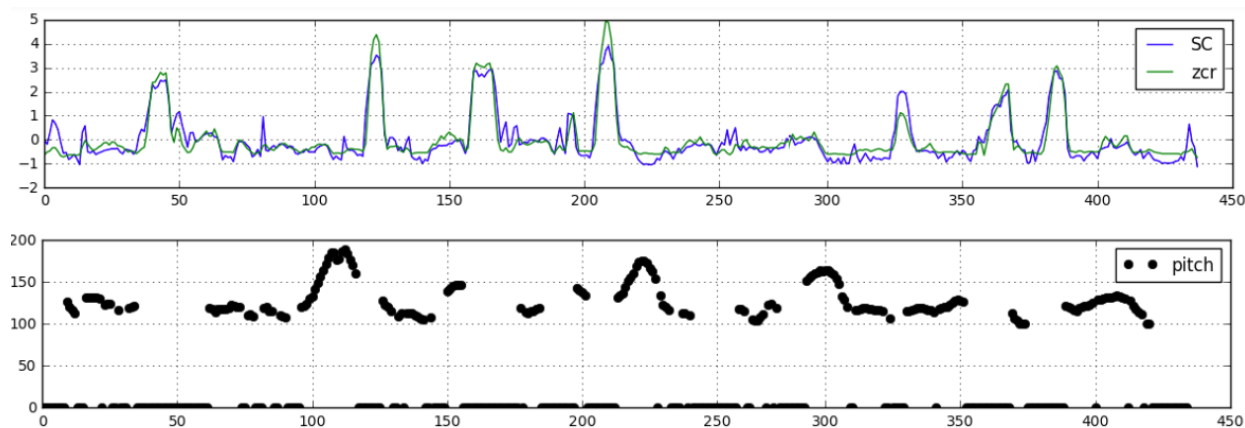


Рис. 4. Иллюстрация корреляции дескрипторов SC и ZCR

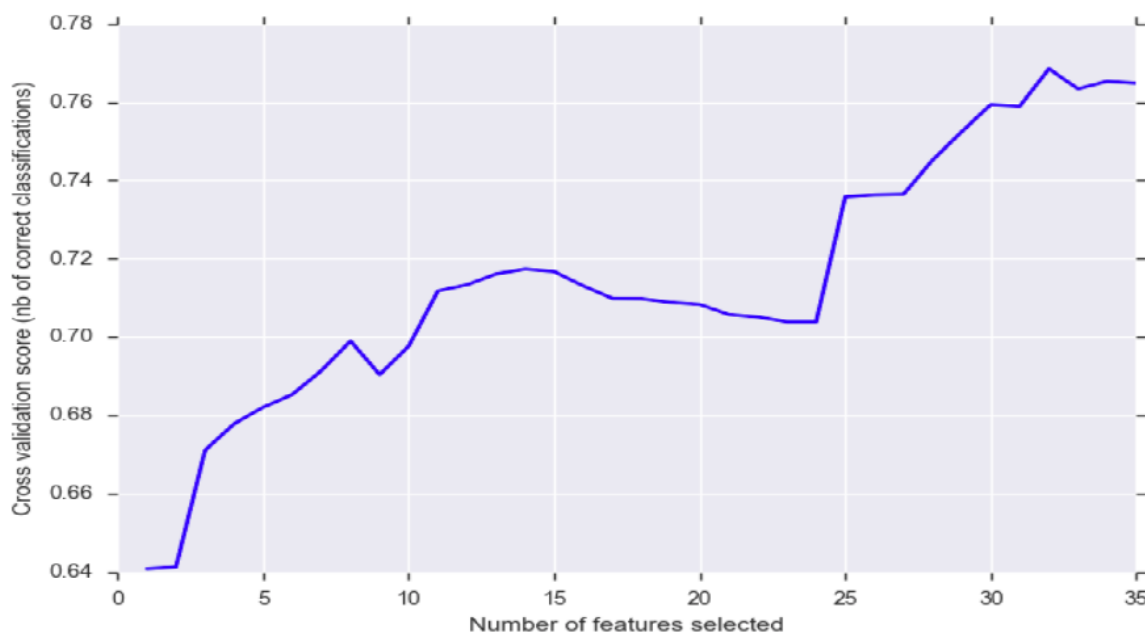


Рис. 5. Результаты рекурсивного исключения признаков с помощью SVM

В таблице 1 приведен список самых релевантных признаков, отранжированных в порядке убывания их значимости, полученные на основе случайного леса деревьев решений. Как видно из таблицы, наряду со спектральной дисперсией, наиболее

значимыми оказались гармонические спектральные дескрипторы, что резонно, т.к. речь имеет более ярко выраженную гармоническую структуру.

Эксперименты производились на компьютере со следующими характеристиками: процессор Intel Core i5 с тактовой частотой 3,5 ГГц; объем оперативной памяти 8 Гб. Скорость расчета всех параметров аудиосигнала оказалась равна, в среднем, 120х (120 секунд сигнала обрабатываются за 1 секунду), что дает возможность использовать алгоритм в реальном времени.

Таблица 1 – Наиболее значимые дескрипторы аудиофрейма

Название дескриптора	Степень значимости
Спектральная дисперсия	0.086
Первый компонент трехцветности (T1)	0.079
Гармоническая спектральная дисперсия	0.071
Третий компонент трехцветности (T3)	0.067
OER	0.061
Второй компонент трехцветности (T2)	0.055
Гармонический спектральный центроид	0.049
Второй коэффициент PNCC	0.048
Спектральная энтропия	0.035
Спектральный центроид	0.034

Выводы. Проведенные эксперименты показали перспективность подхода к автоматическому обнаружению речевой активности, основанного на совместном анализе коэффициентов PNCC с амплитудно-временными, спектральными и гармоническими дескрипторами аудиосигнала. Анализ таких особенностей спектра, как центр масс спектральной энергии, спектральная равномерность, частота спада энергии, шумность, частота основного тона, энергии гармоник и разгармонизация, позволяет повысить робастность системы анализа информативности речи и обнаружения речевой активности. На примере репозитория фоновых звуков и речи с использованием случайного леса деревьев принятия решений получена точность бинарной классификации «речь / не речь» на отметке 86-88%. Наиболее значимыми признаками оказались спектральная дисперсия и гармонические спектральные дескрипторы, хорошо характеризующие речь. Размер выборки (как речи, так и фона) был недостаточно велик для полноценного анализа эффективности моделей, поэтому, в целом, показатели свидетельствуют о том, что выбранные в работе подходы перспективны. Вычислительная сложность предложенного в статье метода относительно невелика и позволяет использовать его в реальном времени. Дальнейшая работа связана с апробацией альтернативных моделей глубокого машинного обучения при анализе информативности речевых участков звукового сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. New Era for Robust Speech Recognition. Exploiting Deep Learning / S. Watanabe, M. Delcroix, F. Metze, J. R. Hershey. – Springer International Publishing, 2017. – 436 p.
2. Kim C. Power-Normalized Cepstral Coefficients (PNCC) for Robust Speech Recognition / C. Kim, R. M. Stern // IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. – Vol. 24 (7). – 2016. – P. 1315-1329.
3. Milner B. A Comparison of Front-End Configurations for Robust Speech Recognition / B. Milner // International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 2002. – Vol. 1. – P. 797-800.

4. Meyer B. Robustness of spectro-temporal features against intrinsic and extrinsic variations in automatic speech recognition / B. Meyer, B. Kollmeier // *Speech Communications*. – 2011. – Vol. 53 (5). – P. 753-767.
5. Харкевич А. А. Борьба с помехами / А. А. Харкевич. – 2-е изд. – Москва : Наука, 1965. – 276 с.
6. Секунов Н. Ю. Обработка звука на PC / Н. Ю. Секунов. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2001. – 1248 с.
7. Николенко С. Глубокое обучение / С. Николенко, А. Кадури, Е. Архангельская. – Санкт-Петербург : Питер, 2018. – 480 с.
8. Features for voice activity detection: a comparative analysis / S. Graf, T. Herbig, M. Buck, G. Schmidt. – Текст : электронный // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. – 2015: 91. – URL: <https://doi.org/10.1186/s13634-015-0277-z> (дата обращения: 16.01.2020).
9. Segbroeck M. Van. A robust frontend for VAD: exploiting contextual, discriminative and spectral cues of human voice / M. Van Segbroeck, A. Tsiartas, S. Narayanan. – Текст : электронный // *INTERSPEECH 2013 : 14th Annual Conference of the International Speech Communication Association Lyon, France, August 25-29, 2013*. – P. 704-708. – URL: https://www.isca-speech.org/archive/archive_papers/interspeech_2013/i13_0704.pdf (дата обращения: 16.01.2020).
10. Chang J. Voice activity detection based on multiple statistical models / J. Chang, N. Kim, S. Mitra // *IEEE Transactions on Signal Processing*. – 2006. – Vol. 54 (6). – P. 1965-1976.
11. VoxForge : [сайт]. – URL: <http://www.voxforge.org/home> (дата обращения: 23.03.2020). – Текст : электронный.

Поступила в редакцию 28.03.2020 г.

INFORMATIVENESS ANALYSIS OF AUDIO FRAGMENTS FOR SPEECH RECOGNITION UNDER NOISY CONDITIONS

Sharii T.V.

The article presents novel method for automatic voice activity detection in noisy sound signals relying on efficient machine learning models. The description is given of a general scheme and a robust algorithm for evaluating the features of a sound frame based on time-domain, spectral and cepstral analysis of the signal. The results of experiments on audio features selection and recognition are given. In experiments support vector machines and ensembles of decision trees were used.

Keywords: VAD, harmonic spectral features, PNCC, machine learning.

Шарий Тимофей Вячеславович

кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: tsphere@mail.ru

Sharii Timofei Viacheslavovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department Computer Technologies of Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

ОСНОВЫ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ ОПТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2020 Данилов В.В., Тимошенко Н.А., Третьяков И.А.

В настоящей работе рассматриваются основы элементной базы в рамках оптических информационных технологий, где электромагнитное поле является носителем информации, а электромагнитные волны его переносчиком. Основу элементной базы оптических информационных технологий составляют дифракционные решетки, диафрагмы, линзы и зеркала.

Ключевые слова: дифракция Френеля, дифракция Фраунгофера, ближняя зона, дальняя зона, область «тени», транспарант.

Введение. Электромагнитное поле оптического диапазона, как носитель информации, по своей информационной емкости и скорости переноса информации является непревзойденным. Основу элементной базы оптических информационных технологий составляют дифракционные решетки, диафрагмы, линзы и зеркала. Принцип действия этих элементов (практически всех) основан на дифракции света. Математическое описание теории дифракции электромагнитного поля, одно из самых сложных [1]. Ниже предлагаются приближенные методы решения дифракционных задач. При этом предполагается известным поле в некоторой плоскости, и стремиться будем получить точное выражение для поля в произвольной точке. Если принять, что известно поле, например в плоскости $z = 0$, то вид решения в значительной мере определяется тем, в какой части пространства находится интересующая нас область, т. е. является ли она областью «тени», Френеля или Фраунгофера [2]. В рассмотрении будем предполагать, что рассматриваются поля, распространяющиеся только под малыми углами к оси z (параксиальное приближение).

Тонкая пластина, толщина и прозрачность которой являются функцией координат точек ее поверхности, в оптическом приборостроении получила название транспарант. В простейшем случае это фотографическая пленка с нанесенным на нее изображением предмета. Более сложный вариант, дифракционная решетка, представляющая собой стеклянную пластинку с вырезанными параллельными узкими канавками и т. п.

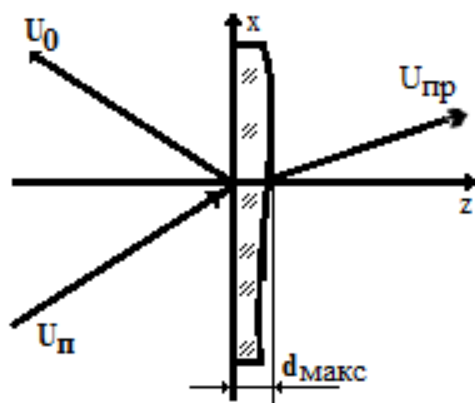


Рис. 1. Транспарант как модулятор

Допустим, что ось z перпендикулярна плоскости транспаранта, а прозрачность и толщина его функции x и y . Далее, пусть на транспарант слева от него падает электромагнитная волна (рис. 1). Процесс сопровождается возникновением отраженной и преломленной волны. Для определенности, будем считать транспарант тонким и таким, что даже максимальная его толщина $d_{\max}$ попадает в область «тени»:

$d_{\text{макс}} \leq 0,2l_{\text{мин}}^2 / \lambda$, где $l_{\text{мин}}$ - наименьший размер неоднородности поля в плоскости транспаранта. Приняв $l_{\text{мин}} = 0,5 \text{ мм}$, что, по-видимому, является достаточно малой величиной, а $\lambda = 1 \text{ мкм}$, то $d_{\text{макс}} = 5 \text{ см}$. Принятое значение для максимальной толщины должно быть уменьшено в соответствии с величиной скорости распространения электромагнитной волны в материале транспаранта. Тогда при $l_{\text{мин}} \approx 0,5 \text{ мм}$ толщина транспаранта не должна превышать нескольких сантиметров.

В оптическом приборостроении, например при изготовлении голографических пластинок, размер неоднородности $l_{\text{мин}}$ может быть значительно меньше указанной величины, а толщина транспаранта также должна быть достаточно малой. Если в минимальной неоднородности укладывается n волн, то $d_{\text{макс}} \leq 0,2n^2\lambda$. Пусть $n = 10$, тогда $d_{\text{макс}} \leq 20\lambda$. Это требование обычно удовлетворяется при побитовой записи информации на оптические диски [4].

При рассмотрении транспаранта как «четырёхполюсник», для его описания введем коэффициентами отражения $\Gamma(x, y)$ и пропускания $T(x, y)$. Поле справа от транспаранта равно преломленной волне. Очевидно, что:

$$U_{\text{пр}} = TU_n. \quad (1)$$

В общем случае коэффициент пропускания T - величина комплексная [1]:

$$T(x, y) = |T(x, y)| \exp[i\varphi_T(x, y)], \quad (2)$$

модуль коэффициента пропускания характеризует прозрачность транспаранта, аргумент - набег фазы электромагнитной волны в транспаранте, зависящий от его толщины. Если считать падающую и преломленную волны соответственно входным и выходным сигналами, то выражению (1) с учетом (2) можно придать следующий вид:

$$U_{\text{вых}}(x, y) = |T(x, y)| \exp[i\varphi_T(x, y)] U_{\text{вх}}(x, y). \quad (3)$$

Приведенное выражение иллюстрирует процедуру модуляции транспарантом падающей на него волны, что приводит к изменению амплитуды и фазы волны. Амплитудная модуляция определяется модулем коэффициента пропускания $|T(x, y)|$, а фазовая - его аргументом $\varphi_T(x, y)$. В случае, одинаковой его толщины, получаем амплитудную модуляцию. Если прозрачность транспаранта постоянна, тогда фазовую модуляцию.

Процедура, реализуемая транспарантом, сопряжена с преобразованием, выполняемым пространством, ограниченным двумя параллельными плоскостями. Если такая геометрия пространства и плоскостей изменяет спектр входного сигнала, умножая его на функцию пространственных частот (коэффициент передачи), то транспарант изменяет входной сигнал, умножая его на функцию координат (коэффициент пропускания). Следовательно, транспарант, это модулятор входного сигнала, а пространство, ограниченное параллельными плоскостями, фильтр или модулятор спектра входного сигнала. Для пространства, ограниченного параллельными

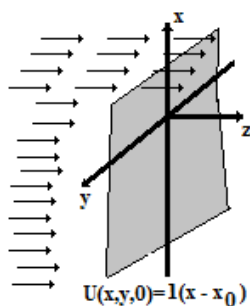
плоскостями, входной и выходной сигналы связаны интегралом Дюамеля, а для транспаранта интегралом Дюамеля связаны спектральные плотности входного и выходного сигналов. Пространство ограниченное параллельными плоскостями, это линейная система, инвариантная относительно сдвигов по координатам, а транспарант, линейная система, инвариантная относительно сдвигов в частотной области.

Математические операции, выполняемые транспарантом и фильтром, широко используются в оптических информационных технологиях и позволяют правильно рассчитать оптическую систему обработки и передачи информации. Бытующее представление о том, что линза фокусирует свет, является неточным. Далее покажем, что линза не фокусирует, а модулирует по фазе падающую на нее электромагнитную волну. Фокусирующим свойствами линза обладает только за счет связи с пространством ограниченным параллельными плоскостями. Следовательно, процесс фокусирования включает пространственные модуляцию и фильтрацию.

Основная часть. Исследуем геометрию взаимодействия, когда поле в плоскости $z = 0$ имеет вид $U(x, y, 0) = 1(x - x_0)$. Однако, при $x < x_0$ поле равно нулю, а при $x > x_0$ равно единице, тогда рассматриваемое поле создается плоской электромагнитной волной единичной амплитуды, распространяющейся вдоль оси z , на пути которой находится плоское непрозрачное препятствие - экран (рис. 2).

Дифракция на краю экрана. Выражение для поля в произвольной точке определяется соотношением [2].

$$U(x, y, z) = -(0,5\pi) \frac{d}{dz} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta, 0) \frac{\exp(ik\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2})}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}} d\xi d\eta.$$



В рассматриваемом случае $U(\xi, \eta, 0) = 1(\xi - x_0)$, поэтому:

$$U(x, y, z) = -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d}{dz} \int_{x_0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(ik\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2})}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}} d\xi d\eta.$$

Введя новую переменную (вместо η), $v = \eta - y$, получим выражение :

$$U(x, y, z) = -\frac{1}{\pi} \cdot \frac{d}{dz} \int_{x_0}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(ik\sqrt{(x-\xi)^2 + v^2 + z^2})}{\sqrt{(x-\xi)^2 + v^2 + z^2}} dv \right] d\xi, \quad (4)$$

согласно которому поле не зависит от y , что обусловлено симметрией, потому как заданное поле в плоскости $z = 0$ также не зависит от координаты y . Для вычисления внутреннего интеграла в выражении (4) используем прием из [3]

$$\frac{\exp\left(i\mu\sqrt{1+u^2}\right)}{\sqrt{1+u^2}}du = i\frac{\sqrt{\pi}}{2}\Gamma\left(\frac{\mu}{2}\right)H_0^{(1)}(\mu), \text{ где } \Gamma(x) - \text{гамма-функция; } H_0^{(1)} - \text{функция}$$

Ханкеля. Сделав обозначения $u = \frac{v}{\sqrt{(x-\xi)^2 + z^2}}$; $\mu = k\sqrt{(x-\xi)^2 + z^2}$ получим:

$$U(x, y, z) = -\frac{1}{i2\sqrt{\pi}} \cdot \frac{d}{dz} \int_{x_0}^{\infty} \Gamma\left(\frac{k\sqrt{(x-\xi)^2 + z^2}}{2}\right) \cdot H_1^{(1)}\left(k\sqrt{(x-\xi)^2 + z^2}\right) d\xi. \quad (5)$$

Выражение (5) упростим, используя приближенное решение, основанное на преобразовании Френеля [4]:

$$U(x, y, z) = \frac{k}{\pi iz} \exp(ikz) \int_0^{\infty} \int_{x_0}^{\infty} \exp\left[ik \frac{(x-\xi)^2 + \eta^2}{2z}\right] d\xi d\eta. \quad (6)$$

Исследуем часть выражения (6), т.е. интеграл $I = \int_{x_0}^{\infty} \exp\left[ik \frac{(x-\xi)^2}{2z}\right] d\xi$. Перейдем

к новой переменной t по формуле $\xi - x = \sqrt{(\pi z / k)t}$. Получим:

$$I = \sqrt{\pi z / k} \int_{\left(x-x_0\right)\sqrt{\frac{k}{\pi z}}}^{\infty} \exp\left(i\frac{\pi}{2}t^2\right) dt. \quad (7)$$

Введем сокращения в виде обозначений $\sqrt{\pi z / k} = A$; $\left(x-x_0\right)\sqrt{k / (\pi z)} = v$ и разобьем интеграл (7) на два:

$$I = A \int_v^{\infty} \exp\left(i\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = A \left[\int_{-v}^0 \exp\left(i\frac{\pi}{2}t^2\right) dt + \int_0^{\infty} \exp\left(i\frac{\pi}{2}t^2\right) dt \right]. \quad \text{Второй интеграл}$$

вычисляется по формуле [16]: $\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-at^2) dt = 0,5\sqrt{\pi/a}$ и равен $(1+t)/2$. Первый

интеграл представим в виде:

$$I_1 = A \int_{-v}^v \exp\left(i\frac{\pi}{2}t^2\right) dt = A \int_0^v \left(\cos\frac{\pi}{2}t^2 + i \sin\frac{\pi}{2}t^2 \right) dt = A \left[\int_0^v \cos\frac{\pi}{2}t^2 dt + i \int_0^v \sin\frac{\pi}{2}t^2 dt \right].$$

Имеем интегралы Френеля $C(v) = \int_0^v \cos\frac{\pi}{2}t^2 dt$ и $S(v) = \int_0^v \sin\frac{\pi}{2}t^2 dt$ [3].

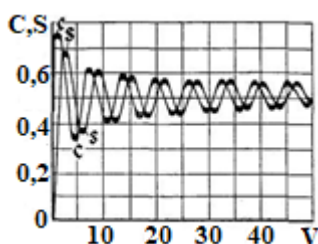
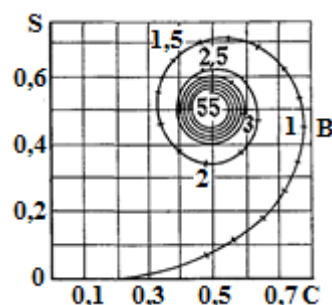
Рис. 3. Функции Френеля $C(v)$ и $S(v)$ 

Рис. 4. Спираль Корню

Функции $C(v)$ и $S(v)$ нечетные, при $v \rightarrow \infty$ обе функции стремятся к $1/2$. Таким образом, $I = A \left[\frac{1+i}{2} + C(v) + iS(v) \right]$, учитывая что $\int_0^{\infty} \exp(-ik \frac{\eta^2}{2z}) d\eta = 0,5\sqrt{2\pi iz/k}$, то:

$$U(x, y, z) = \frac{\exp(ikz)}{\sqrt{2i}} \left[\frac{1+i}{2} + C(v) + iS(v) \right]. \quad (8)$$

Интегралы Френеля табличные, однако, для наглядности, используем спираль Корню (рис. 4), представляющую построенную в прямоугольных координатах функцию $F(v) = C(v) + iS(v)$, где $C(v)$ отложена по вещественной оси, $S(v)$, по мнимой. В случае известного значения аргумента v , можно сразу найти $C(v)$ и $S(v)$, потому что длина дуги спирали Корню равна аргументу функции Френеля, например на рис. 4 дуга $OB = v = 1$. Интенсивность поля пропорциональна квадрату модуля его комплексной амплитуды. Из выражения (8) находим

$$U(x, y, z) = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{2} + C \right)^2 + \left(\frac{1}{2} + S \right)^2 \right]}.$$

Когда $x \rightarrow -\infty$, то и переменная v стремится к $-\infty$, а $C(v)$ и $S(v)$ стремятся к $(-1/2)$. Следовательно, для интенсивности поля при $v \rightarrow \infty$ получим нуль. При $x \rightarrow +\infty$ переменная $v \rightarrow +\infty$, а $C(v)$ и $S(v)$ стремятся к $1/2$ и для интенсивности поля получаем 1. На краю экрана $x = x_0$, а $v = 0$ и $C(0) = S(0) = 0$, поэтому для амплитуды поля получаем $1/2$. С помощью спирали

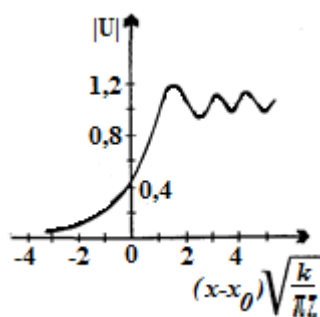


Рис. 5. Амплитуда поля при дифракции на краю экрана

Корню может быть получена интенсивность в других точках. На рис. 5 показана кривая зависимости амплитуды поля от $v = (x - x_0)\sqrt{k/(\pi z)} = (x - x_0)\sqrt{2/(z\lambda)}$. График соответствует любым значениям x_0, k, z , что дает возможность проанализировать характер изменения поля при изменении λ и расстояния от экрана z .

Так как λ и z входят в выражение для v в виде произведения, то при уменьшении одной из этих величин и увеличении другой в такое же число раз величина поля не изменится. Например, если длину волны уменьшить в два раза, то для того чтобы получить прежнее распределение поля вдоль оси x , нужно расстояние z увеличить в два раза.

Вблизи экрана (малые значения z) при $x > x_0$ для v получим большую положительную величину, а при $x < x_0$ – большую отрицательную величину. В этих областях поле равно соответственно единице и нулю (область «тени»). По мере удаления от экрана резкая граница между светлой и темной областями исчезает, появляются полосы различной освещенности, что соответствует на графике (рис. 5) волнистой линии.

Дифракция на щели. Рассмотрим дифракционные явления на краю экрана, что позволит решить задачу дифракции на щели. Пусть щель создана двумя плоскими непрозрачными экранами (рис. 6), где $2x_0$ – ширина щели.

На экран, слева вдоль оси z падает плоская волна единичной амплитуды, поэтому можно считать, что справа амплитуда поля на экране равна нулю, а в щели – единице. Используя преобразование Френеля, определим поле в произвольной точке в виде:

$$U(x, y, z) = \sqrt{k/(2\pi iz)} \exp(ikz) \int_{-x_0}^{x_0} \exp\left(ik \frac{(x-\xi)^2}{2z}\right) d\xi.$$

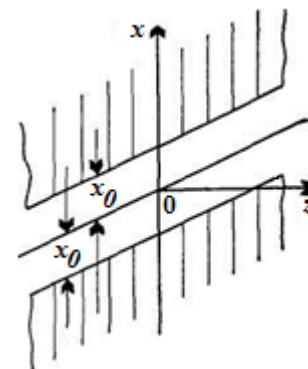


Рис.6. Щель, созданная двумя полуплоскостями

Представим данное выражение в виде суммы трех слагаемых:

$$U(x, y, z) = \sqrt{k/(2\pi iz)} \exp(ikz) \left(\int_{-\infty}^{x_0} + \int_{-x_0}^{\infty} - \int_{-\infty}^{-x_0} \right) \exp\left(ik \frac{(x-\xi)^2}{2z}\right) d\xi.$$

Дифракция на верхнем крае щели, описывает первое уравнение. Второе уравнение, на нижнем, третье – падающую волну с обратным знаком. На рис. 7 показаны графики для дифракционных картин на краях щели и результирующего поля.

При построении графика для результирующего поля необходим учет комплексного характера амплитуды $U(x, y, z)$. Представленные графики позволяют качественно рассмотреть изменение характера дифракции при увеличении расстояния z .

Графики для амплитуды поля в трех характерных областях: «тени», Френеля и Фраунгофера, показаны на рис. 8.

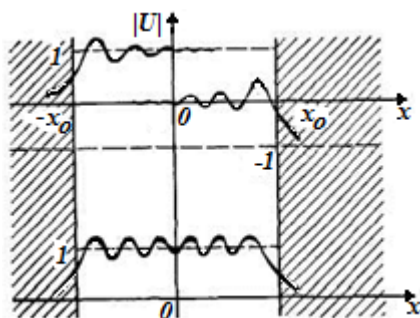


Рис. 7. Графики зависимости амплитуды поля на краях щели и результирующего поля от пространственной координаты

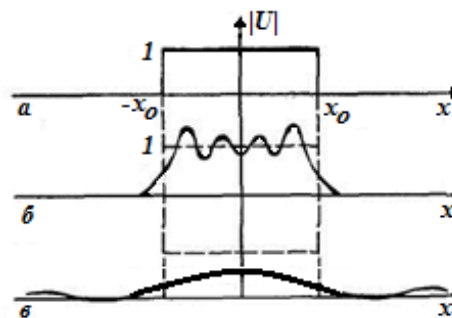


Рис. 8. Дифракция на щели в областях «тени», Френеля и Фраунгофера

В области «тени» график точно описывает распределение поля в щели и имеет вид импульса прямоугольной формы. В области Френеля поле получается путем преобразования Френеля от «импульса прямоугольной формы». В области Фраунгофера, использовано преобразование Фурье от того же «импульса». Графики наглядно показывают, как пространство преобразует сигнал в его спектр.

Простым получается выражение для поля бесконечно узкой щели. Считая, что щель совпадает с осью y и поле в ней описывается функцией $\delta(x)$. Используя приближение Френеля [4] найдем поле в виде:

$$U(x, y, z) = \sqrt{k/(2\pi iz)} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ikx^2}{2z}\right). \quad (9)$$

По формальному описанию, это поле цилиндрической волны, радиус волнового фронта которой равен расстоянию от источника z . При малых значениях x (вблизи оси z) последний экспоненциальный множитель можно заменить единицей, тогда получим выражение $U(x, y, z) = \sqrt{k/(2\pi iz)} \exp(ikz)$, описывающую плоскую волну. Так как это выражение не зависит от x , то можно считать, что оно пропорционально спектральной плотности сигнала $\delta(x)$. Таким образом, вблизи оси z получаем область Фраунгофера.

Дифракционные решетки. Транспарант, коэффициент пропускания T которого описывается функцией вида $T(x, y) = T(x) = T(x + nl)$, где n - нуль или целое число; l - период, назовем прямолинейной дифракционной решеткой. Зависимость коэффициента пропускания дифракционной решетки от координаты x может и не быть периодической. Остановимся на свойствах периодических решеток.

При падении электромагнитной волны $U_1(x, y)$ на дифракционную решетку, по другую сторону от нее будет поле $U_2(x, y) = T(x)U_1(x, y)$. Тогда получается, что дифракционная решетка модулирует падающую на нее электромагнитную волну по периодическому закону, причем эта модуляция может быть амплитудной, если $T(x)$ - вещественная величина, фазовой - при $|T(x)| = 1$ или комбинированной, в общем случае. У простейшей амплитудной синусоидальной решетки, пропускание определяется в виде $T(x) = \frac{1 + a \cos bx}{1 + a}$, причем $0 \leq a \leq 1$, так как коэффициент пропускания не может быть отрицательным. Геометрия эксперимента такова, что на

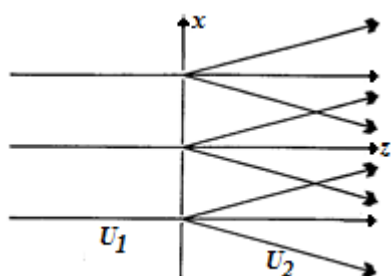


Рис. 9. Ход лучей при дифракция плоской волны на синусоидальной решетке

эту решетку перпендикулярно к ней падает плоская волна постоянной амплитуды U_0 , тогда на выходе

решетки получим $U_2 = U_0 \frac{1 + \cos bx}{1 + a}$.

Воспользовавшись формулой Эйлера, получим равенство

$$U_2 = \frac{U_0}{1 + a} \left(1 + \frac{1}{2} a \exp(ibx) + \frac{1}{2} a \exp(-ibx) \right), \quad \text{которое}$$

показывает, что выходной сигнал представляет собой три плоские волны, распространяющиеся под разными углами к оси z (рис. 9).

Направление распространения падающей и первой волны совпадает с осью z . Поиск угла α_1 между направлением распространения второй волны и осью z , начнем с того что воспользуемся выражением для амплитуды плоской волны при $z=0$, $U = Ae^{ikx \sin \alpha_1}$. В данном случае $\frac{1}{2}a \frac{U_0}{1+a} = A, b = k \sin \alpha_1$, следовательно, $\alpha_1 = \arcsin \frac{b}{k}$. При переходе к периоду решетки $l = \frac{2\pi}{b}$ и длине волны $\lambda = \frac{2\pi}{k}$, получим $\alpha_1 = \arcsin \frac{\lambda}{l}$.

Как правило, период решетки в несколько раз превосходит длину волны. В этом случае $\alpha_1 = \frac{\lambda}{l}$. Угол между направлением распространения третьей волны и осью z равен $(-\frac{\lambda}{l})$. Таким образом, общее выражение для искомых углов принимает вид:

$$\alpha_{1n} = n \arcsin \frac{\lambda}{l} \approx n \frac{\lambda}{l}, \dots, n = 0, \pm 1. \quad (10)$$

При $n=0$ получаем волну нулевого порядка, а при $n=\pm 1$ - две волны первого порядка. Рассмотрим общий случай. Раскладывая $T(x)$ в тригонометрический ряд Фурье, получаем $T(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(in \frac{2\pi}{l} x)$, где $A_n = \frac{1}{l} \int_{-l/2}^{l/2} T(x) \exp(in \frac{2\pi}{l} x) dx$.

При перпендикулярном падении плоской волны к такой решетке, поле на выходе описывается функцией $U_2(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} U_0 A_n \exp(in \frac{2\pi}{l} x)$. Если $n=0$, то получаем одну волну нулевого порядка, при $n=\pm 1$ — две волны первого порядка, при $n=\pm 2$ — две волны второго порядка и т. д.

Углы (10) определяют направления распространения этих волн, где $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, а интенсивность - коэффициентами разложения A_n .

Формула (10) показывает, что транспарант, типа дифракционная решетка может быть использована как анализатор спектра, т. е. элемента, позволяющего определить спектральный состав падающего на него света. Итак, если на дифракционную решетку

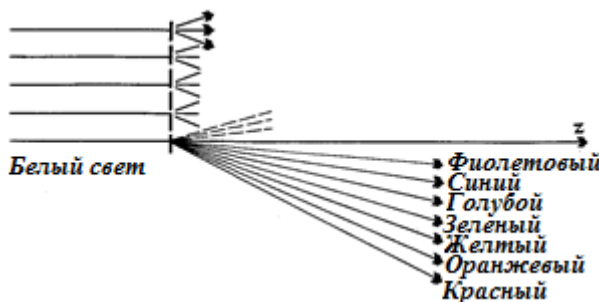


Рис. 10. Процедура разложения белого света дифракционной решеткой

падает немонохроматический свет, который может быть представлен в виде суммы плоских волн с различными частотами, то на выходе решетки получим плоские волны, направление распространения которых определяется их частотой. Ограничиваясь для простоты волнами первого порядка, видим, что электромагнитное поле на выходе дифракционной решетки распределено в пространстве в соответствии с его частотой: ближе к

оси z распространяются плоские волны наиболее высоких частот, а дальше от нее – плоские волны меньшей частоты (рис. 10).

Рассмотрим неперiodическую дифракционную решетку (рис. 11), коэффициент пропускания которой:

$$T(x) = \frac{1 + a \cos bx^2}{1 + a}, \quad |a| \leq 1.$$

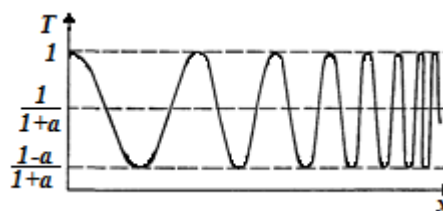


Рис. 11. График зависимости коэффициента пропускания неперiodической дифракционной решетки от пространственной координаты

Пусть $T(x)$ состоит из следующих слагаемых:

$$T(x) = \frac{1}{1+a} \left(1 + \frac{1}{2} a \exp(ibx^2) + \frac{1}{2} a \exp(-ibx^2) \right).$$

Видно, что на выходе имеем три волны: первая совпадает с падающей, вторая и третья модулируются по фазе. Если на решетку падает плоская волна $U_1 = U_0 = \text{const}$, то вторая и третья волны будут

цилиндрическими, причем одна из них $\frac{a}{2(1+a)} U_0 \exp(ibx^2)$, будет расходящаяся, а

другая $\frac{a}{2(1+a)} U_0 \exp(-ibx^2)$ сходящаяся, так как радиусы их волновых фронтов равны $\pm k/(2b)$.

Зонная пластинка. Исследуем свойства транспаранта, типа дифракционные решетки, обладающую круговой симметрией, для которой коэффициент пропускания является функцией только расстояния $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ от центра решетки. В оптических информационных технологиях, интерес представляют решетки с коэффициентом пропускания, являющимся периодической функцией квадрата расстояния: $T = f(\rho^2)$,

так называемые зонные пластинки Френеля. Одна из простейших, решетка с

коэффициентом пропускания $T(x) = \frac{1 + a \cos bx^2}{1 + a}$, $0 < a \leq 1$. Представим выражение для

пропускания T в виде суммы трех слагаемых:

$$T = \frac{1}{1+a} \left(1 + \frac{1}{2} a \exp(ib\rho^2) + \frac{1}{2} a \exp(-ib\rho^2) \right).$$

Если на такую решетку падает плоская волна $U_1 = U_0 = \text{const}$ то на выходе получим:

$$U_2 = \frac{1}{1+a} \left[U_0 + \frac{1}{2} a U_0 \exp ib(x^2 + y^2) + \frac{1}{2} a U_0 \exp -ib(x^2 + y^2) \right].$$

Плоскую волну описывает первый член, второй и третий – соответственно расходящейся и сходящейся сферической волны, радиусами волновых фронтов $R = \pm k/(2b)$ (параксиальное приближение, для сферической волны).

Из курса оптики известно [1], преобразовывать плоскую волну в сферическую может линза. Тогда получается, что зонная пластинка Френеля заменяет одновременно две линзы, выпуклую и вогнутую. Для рассматриваемых решеток, в общем случае,

коэффициент пропускания является периодической функцией $v = \rho^2$, поэтому

$$T = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(inbv) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp(inb\rho^2), \text{ где:}$$

$$A_n = b/(2\pi) \int_0^{\frac{2\pi}{b}} T(v) \exp(-inbv) dv = \frac{b}{\pi} \int_0^{\sqrt{\frac{2\pi}{b}}} T(\rho^2) \exp(-inb\rho^2) \rho d\rho.$$

При падении на пластину плоской волны $U_1 = U_0 = \text{const}$, на выходе получаем

$$U_2 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} U_0 A_n \exp(inb\rho^2), \text{ или:}$$

$$U_2 = U_0 A_0 + U_0 A_1 e^{ib\rho^2} + U_0 A_{-1} e^{-ib\rho^2} + U_0 A_2 e^{i2b\rho^2} + U_0 A_{-2} e^{-i2b\rho^2} + \dots$$

Первый член соответствует волне нулевого порядка (плоская волна), следующие два члена описывают волны первого порядка, это расходящаяся и сходящаяся сферические волны с радиусами $R = \pm k/(2b)$, последующие два члена соответствуют волнам второго порядка, которые также являются расходящейся и сходящейся сферическими волнами, но с другими радиусами

$R_1 = \pm \frac{k}{4b}$ и т. д. Следовательно, поле на выходе пластинки представляется в виде совокупности сферических волн различных порядков. Интенсивность этих волн зависит от свойств пластинки и определяется коэффициентами разложения A_n .



Рис. 12. Зонная пластинка Френеля

Рассмотрим пластину, на которой методом термического напыления, созданы чередующиеся прозрачные и темные кольца различной ширины (рис. 12), получившей название зонной пластинки. Для прозрачных мест пластинки коэффициент пропускания равен единице, а для непрозрачных — нулю. Зависимости коэффициента пропускания от v и от ρ показаны на рис. 13. Если T описывается четной функцией v , пользуясь известными формулами, получаем:

$$T = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(n\pi/2)}{\pi/2} \cos nb\rho^2.$$

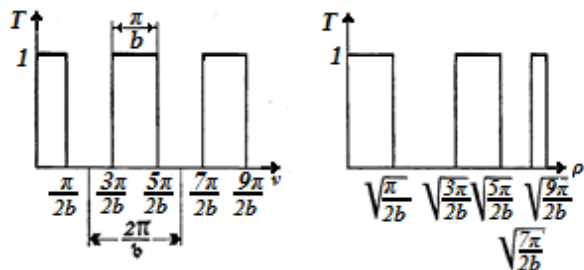


Рис. 13. Зависимости коэффициента пропускания зонной пластинки Френеля от пространственной координаты

Если подать на такую пластинку плоскую волну, распространяющуюся вдоль оси z , то на выходе получим одну плоскую волну с уменьшенной в два раза амплитудой и бесконечно большое число сферических волн. В данном примере сферические волны четного порядка отсутствуют.

Диафрагма. Непрозрачный плоский тонкий экран с отверстием, получил в прикладной оптике название диафрагма. С другой стороны, это транспарант, коэффициент пропускания которого принимает только два значения:

1 (в отверстии) и 0 (в остальной части). Прямоугольная и круглая диафрагма показаны на рис. 14.

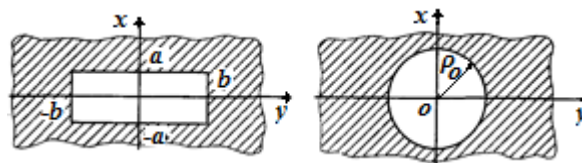


Рис. 14. Геометрия прямоугольной и круглой диафрагм

Основное назначение диафрагмы, ограничение падающего на нее пучка света. При описании поля на одной ее стороне в форме $U_1(x, y)$, то на другой стороне функциональная зависимость может быть представлена выражением $U_2(x, y) = T(x, y)U_1(x, y)$. Пусть на диафрагму перпендикулярно к ней падает плоская волна $U_1 = U_0 = \text{const}$. Исследуем прямоугольную диафрагму. Пренебрегая краевыми эффектами, полагаем, что в отверстии $T(x, y) = 1$, а вне отверстия $T(x, y) = 0$. Принимая размеры диафрагмы равными $2a \times 2b$, получаем:

$$U_2(x, y) = \begin{cases} U_0, & -a \leq x \leq a, -b \leq y \leq b; \\ 0, & \dots |x| > a, |y| > b. \end{cases}$$

Следовательно, амплитуда поля в отверстии постоянна и равна U_0 , а вне отверстия равна нулю. Приведенный пример иллюстрирует, что при падении на диафрагму плоской волны, она является оптическим аналогом электронного устройства формирования импульсов прямоугольной формы.

Поле в произвольной точке $P(x, y, z)$ (рис. 15) может быть получено как сигнал на выходе пространства ограниченного двумя параллельными пространствами, непосредственно примыкающими к диафрагме [4]. Используя приближение Фраунгофера [4] находим:

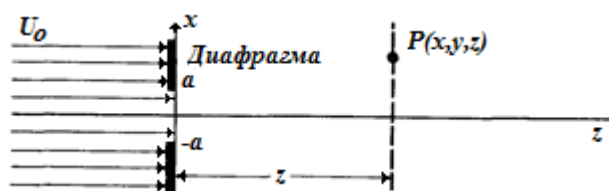


Рис. 15. Падение плоской волны на диафрагму

$$U_{2\text{вых}}(x, y, z) = \frac{2abk}{\pi iz} \exp\left[ik\left(z + \frac{x^2 + y^2}{2z}\right)\right] \cdot \left[\left(\sin \frac{akx}{z}\right) / \left(\frac{akx}{z}\right)\right] \cdot \left[\left(\sin \frac{bky}{z}\right) / \left(\frac{bky}{z}\right)\right].$$

Ознакомившись с [5, 6] становится понятным, что полученное соотношение является аналогом выражения для спектральной плотности импульса прямоугольной формы.

Рассмотрим круглую диафрагму. Пусть перпендикулярно к диафрагме падает плоская волна, с другой стороны которой поле можно записать в виде $U_2(x, y) = U_0 \cdot 1(\rho_0 - \rho)$, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$. Спектральная плотность функции $1(\rho_0 - \rho)$ находится с помощью преобразования Фурье - Бесселя. Воспользовавшись приближением Фраунгофера [4], выражение для амплитуды поля в произвольной точке в области Фраунгофера, примет вид:

$$U_{2вх}(x, y, z) = \frac{\rho_0^2 k}{iz} \exp\left[ik\left(z + \frac{\rho^2}{2z}\right)\right] \frac{2J_1\left(\frac{k\rho_0\rho}{z}\right)}{\frac{k\rho_0\rho}{z}}.$$

На рис. 16 показана зависимость интенсивности поля от пространственных координат для прямоугольной (рис. 16 а) и круглой (рис. 16 б) диафрагм.

Анализ графиков показывает, что основная часть энергии заключена в области, примыкающей к оси z и она соответствует центральному светловому пятну. Ширину области можно определить как расстояние между началом координат на рис. 16 и первым нулем функции $U_{2вх}(x, y, z)$. Для прямоугольной диафрагмы получаем

$$\frac{akx_0}{z} = \pi; \quad \frac{aky_0}{z} = \pi \quad \text{откуда} \quad x_0 = \frac{\lambda z}{2a}; \quad y_0 = \frac{\lambda z}{2b}$$

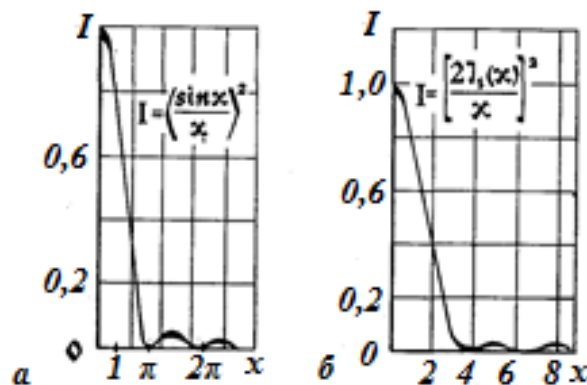


Рис. 16. Зависимости интенсивности поля от пространственной координаты диафрагм:
а - прямоугольной; б - круглой.

В теории антенн известно [7], что ширина диаграммы направленности x_0/z (или y_0/z) определяется отношением длины волны к линейному размеру антенны ($\lambda/(2a)$ или $\lambda/(2b)$). Размер светового пятна (x_0 или y_0) обратно пропорционален размеру диафрагмы ($2a$ или $2b$), т.е. чем больше отверстие в экране, тем меньше центральное светлое пятно. Для круглой диафрагмы, так как первый нуль функции $J_1(v)/v$ равен

$$3,83, \text{ то } \frac{k\rho_0\rho'}{z} = 3,83, \text{ тогда радиус центрального светлого пятна } \rho' = 1,22 \frac{\lambda z}{2\rho_0}.$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф ; перевод с английского С. Н. Бреуса, А. И. Головашкина, А. А. Шубина ; под редакцией Г. П. Мотулевича. – Изд. 2-е, испр. – Москва : Наука, 1973. – 721 с.
2. Гмыря В. А. Оптические информационные технологии. Коэффициент передачи пространства / В. А. Гмыря, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия А. Естественные науки. – 2018. – №3-4. – С. 102-112.
3. Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – Изд. 4-е, перераб. при участии Ю. В. Геронимуса и М. Ю. Цейтлина. – Москва : ГИФМЛ, 1963. – 1108 с.
4. Гмыря В. А. Оптические информационные технологии. Импульсная характеристика / В. А. Гмыря, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2018. – №4. – С. 23-35.
5. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники : в 2 т. Т. 2 / под редакцией Б. Х. Кривицкого. – Москва : Энергия, 1977 – 471 с.
6. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники : в 2 т. Т. 1 / под редакцией Б. Х. Кривицкого, В. Н. Дулина. – Москва : Энергия, 1977. – 504 с.
7. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / под редакцией Д. И. Воскресенского. – Москва : Радиотехника, 2003. – 744 с.

Поступила в редакцию 03.04.2020 г.

FUNDAMENTALS ELEMENT BASE OF OPTICAL INFORMATION TECHNOLOGIES

Danilov V.V., Timoshenko N.A., Tretiakov I.A.

In this paper, we consider the basics of the elemental base in the framework of optical information technologies, where the electromagnetic field is the carrier of information, and electromagnetic waves are its carrier. The basis of the elemental base of optical information technologies consists of diffraction gratings, apertures, lenses and mirrors.

Keywords: Fresnel diffraction, Fraunhofer diffraction, near zone, far zone, “shadow” region, transparency.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Тимошенко Нина Александровна

кандидат юридических наук, доцент, доцент кафедры уголовного права и процесса ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: n.timowenko@gmail.com

Timoshenko Nina Aleksandrovna

Candidate of Laws, Docent, Associate Professor at Department of Criminal Law and Procedure of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Третьяков Игорь Александрович

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

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Head of laboratory at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 669.187.2 : 536.24

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МНОГОЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧНЫХ УСТАНОВОК

© 2020 Кухарев А.Л.

Предложена методика выбора рациональных энергетических параметров электропечных установок, направленная на улучшение их технико-экономических показателей. Приведены перспективные схемотехнические и конструктивные решения для высокомошных многоэлектродных дуговых печей, питающихся напряжением пониженной частоты, эффективность которых подтверждена результатами численного моделирования.

Ключевые слова: дуговая печь, электрод, эффективность, перемешивание расплава.

Введение. В настоящее время в дуговых печах осуществляют самые разнообразные технологические процессы, такие как переплав различных металлов и сплавов, доводка их по химическому составу, восстановление элементов из окислов, переработка различных техногенных отходов и др. [1]. При проведении этих процессов в печах формируется различная геометрическая и энергетическая структура рабочего пространства, однако наличие зон токопроводящей твердой среды и токопроводящего расплава позволяет предложить общую для данных печных комплексов методику выбора рациональных энергетических параметров.

Для достижения наилучших технико-экономических показателей мощных электропечных установок необходимо обеспечивать гибкое управление потоками энергии в процессе плавки, интенсификацию тепломассообмена в печи, например, за счет усиления магнитогидродинамических эффектов, а также снижение электрических и тепловых потерь [2]. Как нами показано в [2], для обеспечения вышеуказанных требований эффективным является перевод питания печей на токи пониженной частоты с осуществлением многоэлектродного токоподвода. В работах [1, 3] уже имеются сведения об опытной эксплуатации печей со специальными преобразователями частоты. Однако, вопросам взаимовлияния электромагнитных и тепловых процессов при различных конструктивных параметрах многоэлектродных печей в литературных источниках уделено недостаточно внимания.

Целью работы является разработка методики выбора рациональных энергетических параметров многоэлектродных печей, а также оценка технико-экономических показателей предложенных технических решений.

Основная часть. На рис. 1 приведен предлагаемый алгоритм выбора рациональных энергетических параметров электропечных комплексов, который в большей степени нацелен на модернизацию существующих печей, но с некоторыми дополнениями может быть применен и к разработке новых печных комплексов.

Алгоритм состоит из трех основных стадий:

1. Анализ основных параметров печного комплекса;
2. Выбор рациональных энергетических параметров;
3. Адаптация автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП).



Рис. 1. Алгоритм выбора рациональных энергетических параметров электропечных установок

Следует отметить, что для разных технологических процессов содержание каждой из стадий может иметь свои особенности.

Обычно при анализе исходных данных (этап 1.1, рис. 1) оценивают или рассчитывают производительность печи по продукту заданного состава G , удельный расход электроэнергии $W_{уд}$. При периодическом технологическом процессе оценивают время работы под током t_p и время безтоковых пауз t_n , а также расход и состав печных газов и др. В качестве конструктивных параметров наиболее важными являются диаметр электродов $D_э$, диаметр $D_в$ и глубина ванны $H_в$, диаметр распада электродов D_p . При анализе энергетических параметров производится оценка мощности источников теплогенерации, т.е. количества тепла, передаваемого за счет электрической дуги Q_d и джоулева нагрева $Q_{дж}$, а также за счет других источников тепла, оцениваются тепловые потери $Q_{пот}$. Для жидких сред рассчитываются основные гидродинамические критерии и критерии теплопереноса (Re , Pr , Gr , Nu). Оцениваются основные параметры электрического режима печи P_n , I_n , U_n . При определении структуры рабочего пространства печи (этап 1.2) оцениваются геометрические и теплоэнергетические параметры технологических зон. При выполнении этапа 1.3 определяются режимы горения дугового разряда (контрагированный или диффузный), а также его основные параметры.

При анализе вторичного энергоподвода (этап 1.4) рассматриваются электромагнитное и тепловое состояние его элементов (шин, гибких кабелей и электродов), оцениваются потери в токопроводящих элементах и в ферромагнитных конструкциях, анализируется влияние поверхностного эффекта и эффекта близости на общие потери энергии и тепловые режимы.

На второй стадии разрабатываются основные решения по энергосиловой части и компоновке оборудования (этап 2.1). Для обеспечения глубокого регулирования электрических параметров высокомоощных печей наиболее перспективной является предложенная нами в [4] схема шестиэлектродной печи с двухсторонним энергопитанием, в которой три сводовых и три подовых электрода получают питание от отдельных групп полупроводниковых преобразователей (рис. 2). При этом в печи оси смежных сводовых и подовых электродов смещены друг относительно друга на угол 60° , причем мощность преобразователей и параметры их работы могут быть различными.

Эффективность электровихревых течений и теплопереноса в ванне расплава такой печи подтверждена нами в [5, 6]. Главным достоинством такой схемы энергопитания является возможность гибкого и независимого управления амплитудой, фазой и частотой питающего напряжения по каждому электроду.

Учитывая опыт автора в области проектирования и конструирования преобразовательной техники [7], наиболее важной задачей является обеспечение надежности функционирования преобразователей в электропечных комплексах, которое может быть достигнуто за счет:

- специальных схем преобразователей, состоящих из резервируемых вентильных модулей;
- применения оборудования для возможного перевода печей на напряжение промышленной частоты;
- снижения высших гармоник входного тока преобразователей за счет применения фазосдвигающих многообмоточных трансформаторов.

На этапе 2.2 в качестве вариантов электромагнитных воздействий в соответствии с технологическими и энергетическими требованиями, может быть выбран род

используемого тока: постоянный, постоянный реверсивный ток, ток пониженной частоты или их комбинация. В [1] отмечено, что наложение постоянной составляющей на ток пониженной частоты дополнительно повышает гибкость управления энергетическими потоками, что особенно важно в стартовых и переходных режимах. Как правило, для данных расчетов используются аналитические методы [1].

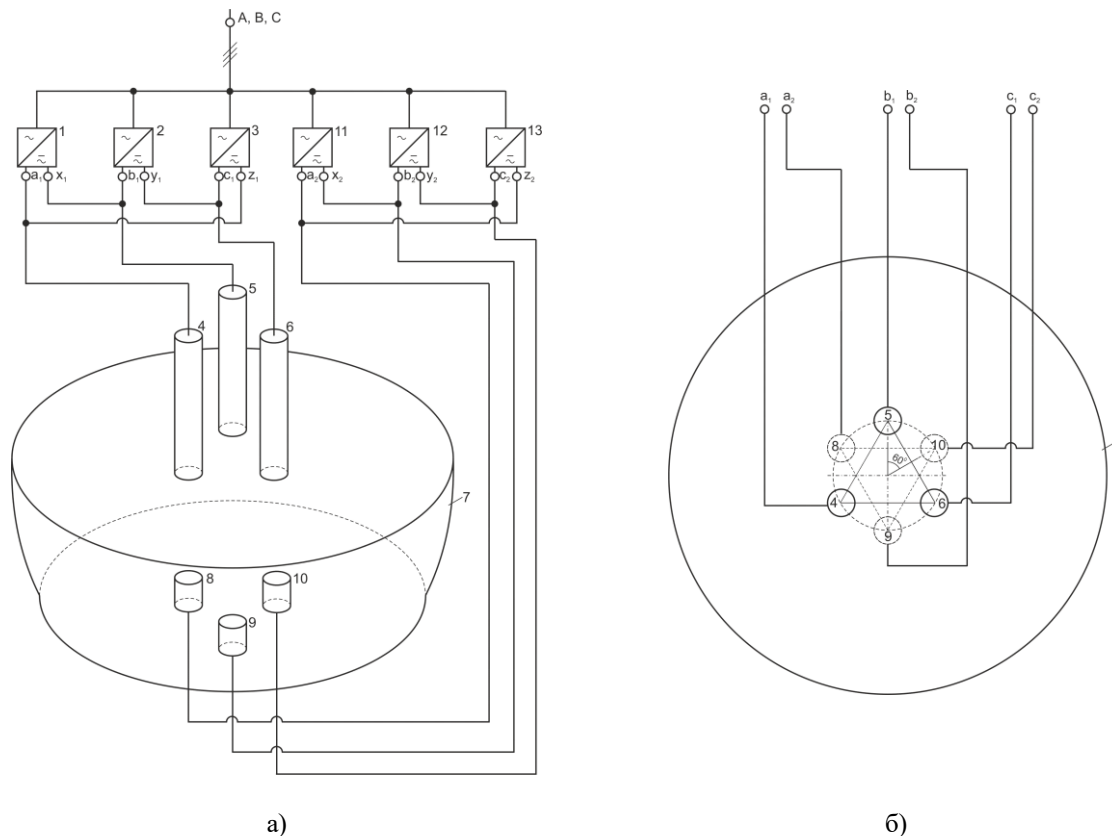


Рис. 2. Шестиэлектродная печь с разделным питанием сводовых и подовых электродов:

а) – общий вид; б) – вид сверху

При питании печи напряжением пониженной частоты актуальным является выбор значений частоты рабочего напряжения f . В [8] предложено определять частоту питающего переменного напряжения по частоте обращения вихревых структур в ванне расплава $f_{вихр}$, которую можно определить с использованием характерных гидродинамических параметров:

$$f \approx \frac{1}{2} f_{вихр} \approx \frac{1}{2} \frac{v_0}{L_{вихр}}, \quad (1)$$

где v_0 – характерная скорость, м/с; $L_{вихр}$ – характерный размер вихря, м, который может быть определен по данным математического моделирования.

В [8] утверждается, что приближение частоты питающего напряжения к частоте вращения вихрей может привести к МГД-резонансу в расплаве, при котором будет происходить повышение амплитуды пульсаций скорости и увеличение степени турбулизации потоков в расплаве, что существенно улучшит процессы теплообмена.

Учитывая выражение (1) и результаты моделирования [5, 6] для многоэлектродных дуговых сталеплавильных печей рациональные значения частоты питающего напряжения должны соответствовать диапазону 0,01-1 Гц.

На этапе 2.3 производится численное моделирование физических процессов в электрической дуге, а также в ванне печи. Как правило, при этих расчетах используется магнитогидродинамическое приближение [5, 6]. В результате электромагнитных расчетов определяются характеристики распределения плотности электрического тока, магнитной индукции, электромагнитных сил и джоулева нагрева. Следует отметить, что при переходе на питание напряжением низкой частоты в печах с металлическими расплавами подавляется скин-эффект, что приводит к увеличению джоулева нагрева, а также улучшению равномерности распределения параметров электромагнитного поля по глубине ванны, что подтверждено нами результатами численного моделирования в работах [9, 10].

Особое внимание при конструировании печей большой емкости должно быть уделено анализу пространственного расположения, электромагнитным и тепловым параметрам вторичных токоподводов. При расчете параметров вторичного энергоподвода, в том числе графитированных или самоспекающихся электродов следует также учитывать улучшение их режимов работы при питании печи постоянным током или током пониженной частоты за счет отсутствия поверхностного эффекта и эффекта близости.

Сравнительная оценка тепловых условий работы графитированных электродов при различных частотах питающего напряжения проводилась нами для условий их работы в дуговой сталеплавильной печи. Моделировался участок электродов диаметром 610 мм, удаленный от электрических дуг, т.е. расположенный приблизительно в области свода печи. При составлении модели принимались допущения об однородности и изотропности сред, в качестве источника тепла в электродах задавался только джоулев нагрев, коэффициенты электропроводности и теплопроводности считались независимыми от температуры. Расчет электромагнитного поля проводился нами по методике [9, 10] при значениях электропроводности материала электродов (графита) $\sigma = 1,8 \cdot 10^5 (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ и при действующих значениях токов в электродах $I = 80 \text{ кА}$. В общем случае функции трехфазного синусоидального тока через электроды будут иметь вид:

$$I_1(t) = \sqrt{2}I \sin(2\pi f), \quad I_2 = \sqrt{2}I \sin\left(2\pi f - \frac{2\pi}{3}\right), \quad I_3 = \sqrt{2}I \sin\left(2\pi f + \frac{2\pi}{3}\right), \quad (2)$$

Температурное поле в электродах определялось на основании уравнения энергии, которое при принятых допущениях может быть записано в виде:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \lambda \nabla^2 T + Q_{\text{дж}}, \quad (3)$$

где ρ – плотность, кг/м^3 ; C_p – теплоемкость, $\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $Q_{\text{дж}}$ – плотность джоулева тепловыделения при прохождении электрического тока по электроду, Вт/м^3 .

Для решения данного уравнения на боковых поверхностях электродов задавались граничные условия третьего рода, учитывающие теплопередачу в окружающую среду за счет конвекции и излучения:

$$\vec{q} \cdot \hat{n} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial \hat{n}} = q_e = \alpha_k (T - T_0) + \varepsilon \sigma_B (T^4 - T_0^4),$$

где α_k – коэффициент конвективной теплопередачи, Вт/м², величина которого определялась нами по эмпирическим выражениям согласно работы [11]; T_0 – температура окружающей среды, К; ε – степень черноты поверхности тела; $\sigma_B = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана.

При моделировании использовались следующие значения параметров: $\rho = 1700$ кг/м³; $C_p = 2000$ Дж/(кг·К); $\alpha_k = 12$ Вт/(м²·К); $T_0 = 1500$ К; $\varepsilon = 0,85$; $\lambda = 210$ Вт/(м·К). На рис. 3 представлены графики распределения теплового поля в поперечном сечении электродов. Видно, что при питании печи напряжением с частотой 50 Гц (рис. 3 а) в каждом электроде области максимальных значений температур формируются вблизи боковой поверхности, обращенной в сторону того электрода, в котором протекающий ток опережает по фазе на угол $\frac{2\pi}{3}$. Это обусловлено

существенным проявлением скин-эффекта и эффекта близости. При питании печи напряжением с частотой 1 Гц (рис. 3 б) распределение температуры симметрично относительно оси электрода.

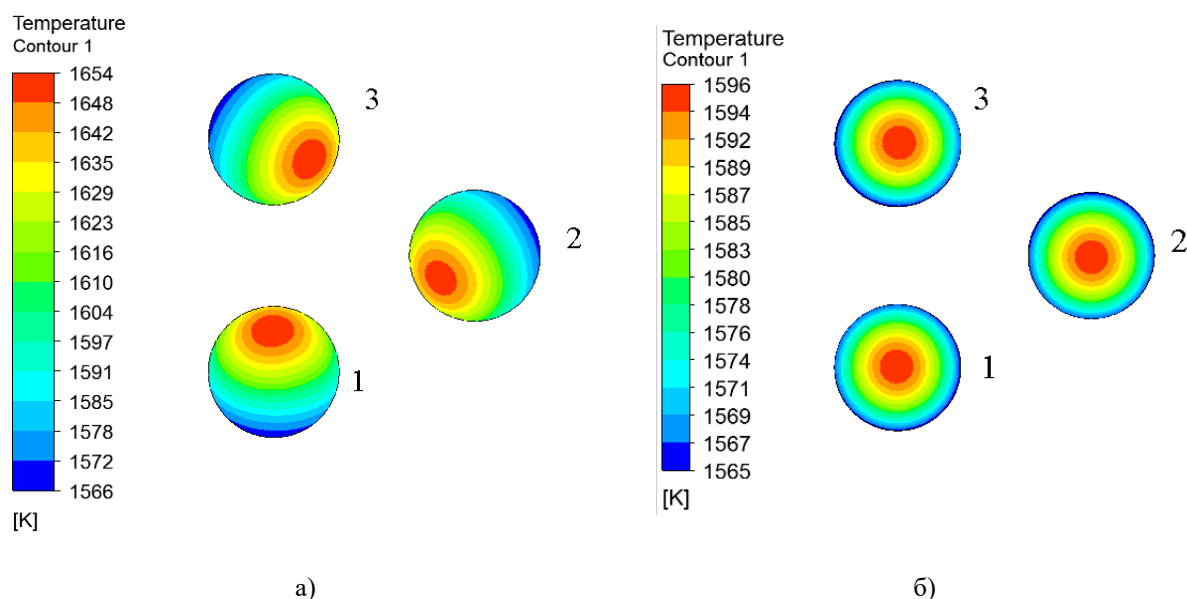


Рис. 3. Сравнение тепловых полей в поперечном сечении графитированных электродов:
а) – при частоте напряжения 50 Гц; б) – при частоте напряжения 1 Гц

Анализ температурной неоднородности в электродах проводился с использованием коэффициента вариации температуры:

$$\kappa_{var} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - T_{cp})^2}}{T_{cp}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где T_i – температура в i -м элементе расчетной сетки, К; N – количество элементов расчетной сетки; T_{cp} – средняя по объему температура, К.

Проведенные расчеты показали, что коэффициент вариации температуры в электродах предлагаемой шестиэлектродной печи (рис. 3 б) более чем в 2 раза меньше, чем в электродах трехэлектродной печи. Отметим, что улучшение равномерности распределения теплового поля в электродах должно способствовать уменьшению их бокового износа, наблюдаемого вследствие окисления графита в процессе плавки.

Отметим, что на этапе 2.3 также может проводиться моделирование дополнительных физических и химических процессов исходя из особенностей технологии плавки.

На этапе 2.4 производится оценка энергетических и технико-экономических показателей электропечного комплекса. В зависимости от рассматриваемого технологического процесса и постановки задачи могут применяться различные критерии оценки, например, производительность печи, энергетические затраты, себестоимость продукции, а также различные критерии, определяющие качество выплавляемого продукта.

Приведем некоторые критерии оценки рациональности энергетических процессов. Одним из критериев эффективного тепломассообмена в расплаве является получение заданного распределения температуры. При этом целевая функция может быть записана в виде условия максимального приближения текущей температуры расплава T_i к заданной температуре T_{30} при минимальной мощности дугового разряда P_0 :

$$J_1 = |T_i - T_{30}| \rightarrow \min, \quad J_2 = P_0(U_n, I_n) \rightarrow \min. \quad (5)$$

В качестве основных ограничений на этом этапе могут применяться предельная мощность системы энергоснабжения, температура футеровки и свода печи, устойчивость дуги и др.

Как правило, в расплаве выплавляемого продукта нежелательны резкие перепады температур, таким образом, необходимо вводить ограничения на градиенты температурного поля. В этом случае целевая функция может быть записана в виде:

$$J_3 = |\text{grad} T| \leq |\text{grad} T|_{\text{дон}}, \quad (6)$$

где $|\text{grad} T|_{\text{дон}}$ – предельно-допустимый градиент температурного поля, К/м.

Так как производительность печи G и удельный расход электроэнергии $W_{y\partial}$, будут зависеть от скорости выравнивания температурного поля в расплаве, необходимо минимизировать время температурной гомогенизации t_z :

$$J_4 = \int_{t_1}^{t_2} t dt = t_z \rightarrow \min, \quad \kappa_{\text{вар}}^{\min} \leq \kappa_{\text{вар}} \leq \kappa_{\text{вар}}^{\max}. \quad (7)$$

где $\kappa_{\text{вар}}^{\min}$, $\kappa_{\text{вар}}^{\max}$ – диапазон возможного изменения коэффициента вариации температуры расплава.

Отметим, что на основании работы [12] и результатов наших исследований, в трехэлектродных печах без применения средств дополнительного перемешивания

течения расплава локализуются в основном в области электрических дуг, а в нижней области ванны и на ее периферии образуются застойные зоны, объем которых может составлять более 20 % от объема, занимаемого расплавом. В застойных зонах процессы температурной и химической гомогенизации будут существенно замедляться.

Проанализируем факторы, влияющие на время гомогенизации расплава.

Во многих работах по перемешиванию металлургических расплавов, в том числе в работах [13-15] показано, что при прочих равных условиях время гомогенизации в основном зависит от удельной мощности перемешивания расплава P_{nep} , (Вт/т), а также коэффициента, учитывающего распределение этой мощности в ванне печи η_{nep} . В работах [13-15] приведены различные зависимости времени гомогенизации при турбулентном процессе перемешивания. Важно, что все они используют коэффициент связи между временем гомогенизации и мощностью перемешивания в виде показателя степени, равного $1/3 \approx 0,33$, при этом результаты расчета хорошо коррелируют с различными экспериментальными данными как в лабораторных, так и в промышленных установках [13-15]. Одна из этих зависимостей имеет вид:

$$t_{zom} = 100 \left(\left(\frac{D_6^2}{H_6} \right)^2 \frac{1}{P_{nep} \cdot \eta_{nep}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (8)$$

В работе [13] также постулируется, что введенная в ванну энергия перемешивания рассеивается в расплаве из-за турбулентности. Поэтому мощность перемешивания с учетом принятой $k-\varepsilon$ модели турбулентности можно оценить по величине специфической генерации турбулентной кинетической энергии, образованной от средних градиентов скорости и от выталкивающей силы G_{kb} , т.е.:

$$P_{nep} \cdot \eta_{nep} = \frac{1}{M} \int_V G_{kb} dV = \frac{1}{M} \int_V G_k dV + \frac{1}{M} \int_V G_b dV, \quad (9)$$

где M – масса расплава, т; V – объем, занимаемый расплавом, м³; G_k – специфическая генерация турбулентной кинетической энергии, образованная от средних градиентов скорости. С использованием компонентов вектора скорости v_x , v_y , v_z [16]:

$$G_k = \eta_T \left[2 \left(\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right) + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right], \quad (10)$$

G_b – специфическая генерация турбулентной кинетической энергии, образованная от выталкивающей силы [16]:

$$G_b = \beta g \frac{\eta_T}{Pr_T} \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (11)$$

где β – коэффициент объемного расширения расплава, K^{-1} ; η_T – коэффициент турбулентной вязкости, $Pa \cdot s$; Re_T – турбулентное число Прандтля.

Результаты моделирования дуговой печи емкостью 180 т при шестиэлектродном токоподводе и частоте напряжения 0,1 Гц и такой же трехэлектродной печи при частоте напряжения 50 Гц приведены в таблице 1 и на рис. 4. Условия моделирования приведены нами в [5, 6]. Из таблицы видно, что в предлагаемой печи удельная мощность перемешивания расплава увеличивается в несколько раз, по сравнению с трехэлектродным вариантом. Таким образом, исходя из (8, 9) можно прогнозировать, что время гомогенизации расплава уменьшится приблизительно на 40-50 %. Для ДСП-180 эта величина снижения времени может составлять 5-6 минут.

Таблица 1. Сравнение показателей

Показатель	Трехэлектродная дуговая печь	Предлагаемая шестиэлектродная печь
Суммарная генерация турбулентной кинетической энергии, приведенная к массе расплава 180 т: $\frac{1}{M} \int_V G_{kb} dV$, Вт/т	4,1	38,3

Достигнутое увеличение мощности перемешивания поясняется интенсификацией электровихревых течений в расплаве печи. Приведенные на рис. 4 графики соответствуют среднему по глубине горизонтальному сечению ванны печи. Для наглядности на этих графиках черными сплошными линиями наложены траектории течения расплава.

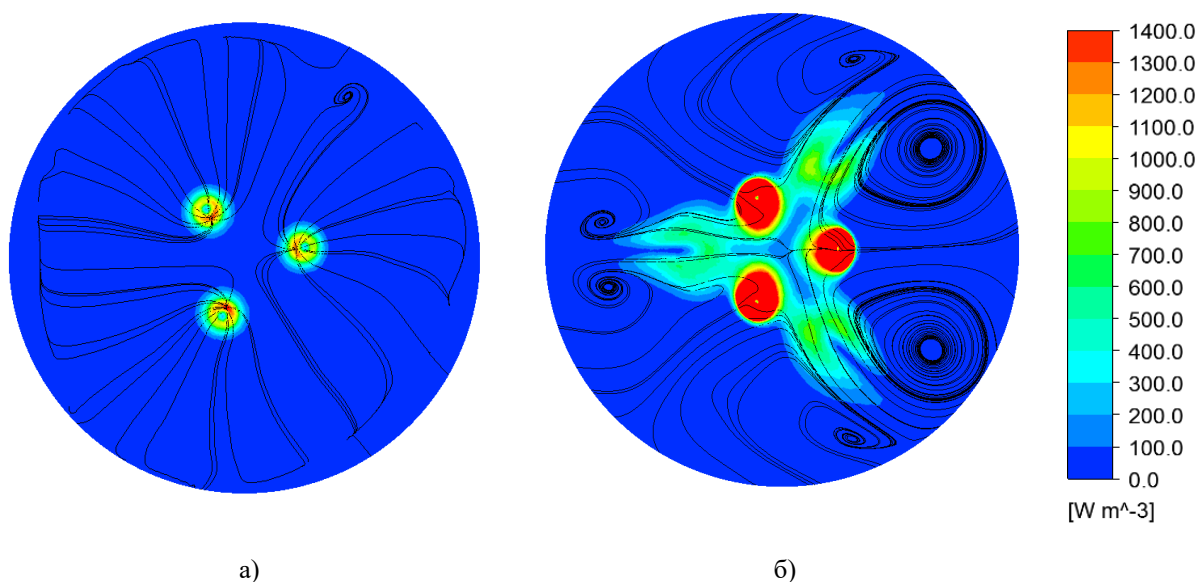


Рис. 4. Сравнение результатов моделирования генерации турбулентной кинетической энергии в расплаве: а) – трехэлектродной печи; б) – шестиэлектродной печи

Таким образом, приведенные расчеты показывают, что эффективность теплопереноса в предложенной шестиэлектродной печи значительно выше, чем в трехэлектродной.

Кроме того, как отмечено в [1], использование для питания печей тока пониженной частоты вместо тока промышленной частоты позволяет повысить коэффициент мощности печей, снизить потери электроэнергии, уменьшить нагрев металлоконструкций от вихревых токов, практически устранить перенос мощности между фазами. Таким образом, также необходимо оценивать параметры передачи энергии от преобразователя частоты к ванне печи, например, по величине потерь электрической энергии в элементах вторичного энергоподвода. Минимум этих потерь может соответствовать следующему функционалу:

$$J_5 = \sum_i (R_i \cdot X_{Li}) \rightarrow \min, \quad (13)$$

где R_i, X_{Li} – соответственно активное и индуктивное сопротивление участков вторичного энергоподвода, Ом.

По нашим расчетам, проведенным по методике [1], показано, что в предлагаемой шестиэлектродной дуговой печи мощностью 150 МВА при токах в электродах 70 кА и частоте 1 Гц за счет уменьшения индуктивного сопротивления печного контура более чем на 10% повышается коэффициент мощности, что дает возможность повысить полезную активную мощность печи на 10-15 % при той же величине электрических потерь. Кроме того, более чем на 40% снижаются потери реактивной мощности, что позволяет снизить затраты на компенсацию реактивной мощности в системе электроснабжения.

На этапе 2.4 также необходимо определять рациональные геометрические параметры рабочего пространства печи и системы энергоподвода. В качестве варьируемых при этом могут быть приняты следующие параметры: заглубление дуги в расплав, диаметр и форма подовых электродов, диаметр распада сводовых и подовых электродов, объем ванны, параметры, определяющие пространственное расположение токоподводов и др.

На основании проведенных исследований выявлено, что на структуру течений расплава наиболее существенно влияет диаметр распада электродов D_p . В качестве примера приведем графики распределения скорости течения расплава в предлагаемой шестиэлектродной печи при различных значениях D_p (рис. 5).

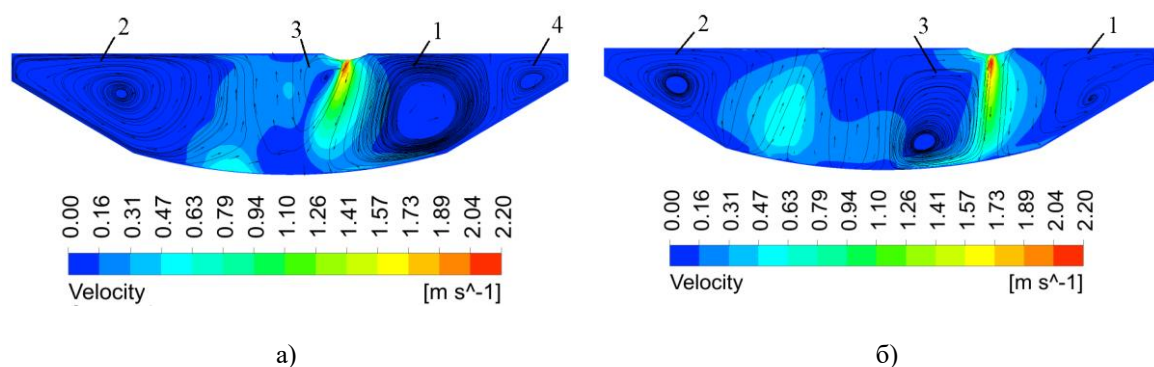


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования полей скорости расплава в вертикальном сечении ванны шестиэлектродной печи при диаметре распада электродов: а) – 1250 мм; б) – 2400 мм

Из рис. 5 а видно, что при $D_p=1250$ мм структура течений формируется из вихря (1), циркулирующего в области дуги, вихря (2), формируемого в области подового электрода и вихря (3), циркулирующего между первым и вторым контурами. Эти течения в большей степени обусловлены электровихревой конвекцией. Вблизи боковой

стенки также образуется вихрь (4), обусловленный термогравитационной конвекцией [6]. При $D_p=2400$ мм (рис. 5 б) структура течений несколько меняется, центры вихрей (1) и (2) перемещаются к соответствующим боковым стенкам, увеличивается интенсивность третьего вихря. Четвертый вихрь, в этом случае отсутствует, т.е. подавляется первым контуром циркуляции. Более детальная оценка изменения положения электродов на структуру течений и на параметры теплопереноса будет выполнена нами в последующих работах.

В качестве основного критерия оценки технико-экономической эффективности электропечного комплекса может применяться критерий приведенных затрат, который в общем виде может быть представлен в следующей форме:

$$J_6 = E_n K + C_u \rightarrow \min ,$$

где E_n – нормативный коэффициент эффективности капиталовложений; K – единовременные капитальные вложения на модернизацию печи, руб; C_u – эксплуатационные затраты, руб.

По предварительным технико-экономическим расчетам, проведенным для ДСП-180 по методике, приведенной в [17] с учетом показателей плавки этой печи на Магнитогорском металлургическом комбинате [18], показано, что сокращение времени плавки на 5 минут и повышение вводимой активной мощности на 11 % позволяет повысить производительность печи на 12 %, при этом срок окупаемости капитальных вложений не превышает 4 года.

Третий этап предложенной процедуры (адаптация АСУТП) необходим для поддержания выбранных рациональных параметров в процессе плавки. На этом этапе определяются рабочие характеристики печи для ведения плавки: мощность печи, время технологических стадий, КПД, удельный расход электроэнергии и др. (этап 3.1). На основе выбранной геометрии рабочего пространства и условий теплообмена определяются требуемые мощность, ток и напряжение на каждом интервале плавки. Далее формируются усовершенствованные алгоритмы контроля и управления энергетическими и материальными потоками, что позволяет в комплексе решить две задачи: идентификацию энергетического состояния процесса плавки и эффективное управление печью в соответствии с рабочими характеристиками, определенными на предыдущей стадии. В работе предлагается дополнительно использовать следующие управляющие параметры по каждому электроду: частота питающего напряжения, форма (синусоидальная, прямоугольная, трапецеидальная, сложная) и фаза питающего напряжения.

Далее (этап 3.2) адаптируются структура и параметры информационно-управляющих каналов АСУТП. Следует отметить, что раздельное управление амплитудой, частотой и фазой напряжения по каждому электроду позволяет симметризовать электромагнитное, а, следовательно, и тепловое поле в печи, что особенно важно при различных нарушениях технологического процесса.

Таким образом, предлагаемый комплекс мероприятий направлен на проектирование энергоэффективных печных комплексов с возможностью реализации интеллектуального многопараметрического управления.

Выводы. С учетом разработанной методологии выбора рациональных энергетических параметров электропечных установок подтверждена эффективность предложенных шестиэлектродных дуговых печей при питании их напряжением пониженной частоты в диапазоне 0,01-1 Гц. На основании численных расчетов показано улучшение условий перемешивания расплава в ванне печи, снижение

неравномерности электромагнитного и теплового полей в графитированных электродах, а также повышение энергетических показателей системы энергоснабжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нехамин С. М. Создание и внедрение энергоэффективных дуговых и шлаковых электропечных комплексов с использованием постоянного тока и тока пониженной частоты : диссертация ... доктора технических наук : 05.09.10 / Нехамин Сергей Маркович ; Национально исследовательский университет МЭИ. – Москва, 2015. – 381 с.
2. Кухарев А. Л. Принципы повышения интенсивности теплообмена в жидких средах дуговых многоэлектродных печей / А. Л. Кухарев, В. В. Белоусов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2018. – № 2. – С. 2-91.
3. Kravchenko P. Use of ultra-low frequency furnaces for ferroalloys melting / P. Kravchenko, S. Balashov, O. Bepalov // Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry: Proceedings of the Fourteenth International Ferroalloys Congress INFACON XIV (May 31 – June 4, 2015, Kiev, Ukraine). – Kiev, 2015. – P. 658-667.
4. Патент 124027 Україна, МПК⁷ H05B 7/144. Система електроживлення багатоелектродної дугової печі : № u201711369 : заявл. 20.11.2017 : опубл. 12.03.2018 / Кухарев О. Л., Ковальчук А. О. – 6 с. – Бюл. № 5.
5. Кухарев А. Л. Численное исследование процессов теплопереноса в расплаве многоэлектродной дуговой печи при учете электровихревых течений / А. Л. Кухарев // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2019. – Вып. 56. – С. 40-48.
6. The Peculiarities of Convective Heat Transfer in Melt of a Multiple-Electrode Arc Furnace / A. Kukharev, V. Bilousov, E. Bilousov, V. Bondarenko // *Metals*. – 2019. – Vol. 9, Is. 11. – P. 1174.
7. Кухарев А. Л. Разработка и испытание высоковольтного преобразователя частоты / А. Л. Кухарев // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2012. – Вып. 37. – С. 297-306.
8. Мусаева Д. А. Экспериментальное и численное исследование переноса импульса и энергии при вынужденной конвекции проводящей жидкости в поле низкочастотных импульсных электромагнитных сил : диссертация ... кандидата технических наук : 01.04.14 / Мусаева Диана Абдулаевна ; Казанский государственный энергетический университет. – Казань, 2017. – 193 с.
9. Кухарев А. Л. Электромагнитное поле в ванне многоэлектродной печи / А. Л. Кухарев // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2018. – № 5 (11). – С. 247-251.
10. Кухарев А. Л. Электромагнитные поля мощных электропечных установок / А. Л. Кухарев // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2017. – № 2 (4), ч. 1. – С. 190-194.
11. Егоров А. В. Расчет мощности и параметров электроплавильных печей / А. В. Егоров. – Москва : МИСИС, 2000. – 272 с.
12. Elkoumy M. Computational Simulation Model for Metallurgical Effects during EAF Refining Stage: Waiting and Arcing Time / M. Elkoumy, M. El-Anwar, A. Fathy // *ISIJ International*. – 2018. – № 58. – P. 1669-1678.
13. Murthy A. Some Fundamental Aspects of Mixing in Metallurgical Reaction Systems / A. Murthy, J. Szekely // *Metallurgical transactions B*. – 1986. – Vol. 17B, № 9. – P. 487-490.
14. Physical study of the impact of injector design on mixing, convection and turbulence in ladle metallurgy / P. Gajjar, T. Haas, K. B. Owusu [et al.] // *Engineering Science and Technology*. – 2019. – Vol. 22, № 2. – P. 538-547.
15. Amaro-Villeda A. M. Effect of slag properties on mixing phenomena in gas-stirred ladles by physical modeling / A. M. Amaro-Villeda, M. A. Ramirez-Argaez, A. N. Conejo // *ISIJ International*. – 2014. – Vol. 54, № 1. – P. 1-8.
16. Ansys Fluent Theory Guide. – Canonsburg : Ansys Inc., 2013. – 780 p.
17. Храпко С. А. Оптимизация режима ведения плавки стали в дуговой сталеплавильной печи по прибыли предприятия / С. А. Храпко // Современная электрометаллургия. – 2003. – № 2 (71). – С. 37-40.
18. Алексеев Л. В. Совершенствование технологии выплавки полупродукта в дуговой сталеплавильной печи с применением жидкого чугуна : автореферат диссертации ... кандидата технических наук : 05.16.02 / Алексеев Леонид Вячеславович. – Магнитогорск : МГТУ им. Г.И. Носова, 2009. – 29 с.

Поступила в редакцию 13.01.2020 г.

CHOICE OF RATIONAL ENERGY PARAMETERS OF MULTI-ELECTRODE ELECTRIC
FURNACE COMPLEXES

Kukharev A.L.

A technique for choosing the rational energy parameters of electric furnaces, aimed at improving their engineering-and-economical performance is proposed. Promising circuitry and design solutions for high-power multi-electrode arc furnaces powered by low-frequency voltage are presented, the effectiveness of which is confirmed by the results of numerical simulation.

Keywords: arc furnace, electrode, efficiency, melt mixing.

Кухарев Алексей Леонидович

кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры горной электромеханики и транспортных
систем Стахановского учебно-научного института
Луганского национального университета им.
Владимира Даля,
ЛНР, г. Стаханов.
E-mail: alex.kuharev@mail.ru

Kukharev Aleksey Leonidovich

Candidate of Engineering Science, Docent,
Associate Professor at Department of Mining
Electromechanics and Transport Systems of
Stakhanov educational and scientific institute of
Lugansk National University named after Vladimir Dahl,
LPR, Stakhanov

УДК 532.525

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ВНЕПЕЧНОЙ ДЕГАЗАЦИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ПРОДУВКОЙ ИНЕРТНЫМ ГАЗОМ И ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЙ РЕЖИМ ТЕХНОЛОГИИ

© 2020 *Захаров Н.И., Бирюков А.Б., Тупилко И.В., Шатович В.А.*

Построена математическая модель процессов теплообмена, включающая уравнение диффузионного процесса в жидкой ванне и уравнение теплопроводности. Первое из этих уравнений учитывает движение расплава во время его выпуска из плавильной печи в ковш в результате воздействия на жидкую ванну падающей струи и всплывающих в металле пузырей аргона. Второе одномерное уравнение рассматривает две области, контактирующие друг с другом: металла и шлака. При этом граница «металл-шлак» движется вверх вследствие наполнения ковша расплавом. Построены зависимости эффективности диффузионного процесса (степени дегазации металла) и потери его температуры в функции технологических параметров. Даны рекомендации по энергоресурсосбережению при реализации рассматриваемой технологии, которое достигается путём снижения расхода аргона до уровня оптимума.

Ключевые слова: конвективная диффузия, теплопроводность, жидкая ванна, азот, математическая модель, внепечная дегазация, интенсивность продувки аргоном, энергоресурсосбережение.

Введение. Проблема энергоресурсосбережения – одна из самых актуальных. Применительно к металлургическим процессам эта проблема конкретизируется в виде разработки энергоресурсосберегающих режимов современных технологий металлургии.

Избыток азота в слитках способствует преждевременному старению металла [1]. Для удаления этого газа наиболее перспективны внепечные способы обработки расплавов [2-5]. Особенного внимания заслуживает способ продувки металла аргоном. Эффективность этого способа возрастает при использовании пористых элементов в днище разливочного ковша и сочетания продувки с выпуском расплава из УКП в ковш [6]. В этом варианте одновременно на повышение эффективности технологии внепечной дегазации металла воздействуют два фактора: высокая площадь поверхности «аргон-металл» и интенсивное перемешивание жидкой ванны. Первый из этих факторов обусловлен большим количеством всплывающих в металле пузырей аргона, а второй – падением в расплав (во время его выпуска из печи) струи металла. Во избежание перехода газов из атмосферы в металл и значительного его переохлаждения на поверхность расплава в ковше сливают синтетический шлак соответствующего состава.

Как инструмент исследования «холодное» моделирование процессов конвективного теплообмена при внепечной дегазации жидкого металла, как известно, неэффективно из-за сложности обеспечения равенства критериев подобия на реальной многопараметрической технологии и его «холодной» модели.

Более целесообразно математическое моделирование, результаты которого количественно согласуются с данными экспериментальных исследований с «горячим» расплавом металла в лабораторных условиях, и качественно – с результатами «холодного» моделирования.

Математическое моделирование позволяет разработать энергоресурсосберегающий режим рассматриваемой технологии.

Существующие в настоящее время математические модели диффузионного процесса [4,7-9] при внепечной дегазации жидкого металла продувкой инертным газом во время слива (выпуска) расплава в ковш под слоем шлака при атмосферном давлении не учитывают теплообмена металла с атмосферой через слой шлака.

Цель настоящей работы заключается в разработке энергоресурсосберегающего режима технологии на основе математической модели тепломассопереноса в расплаве металла.

Основная часть. Математическая постановка задачи теплообмена включают уравнение теплопроводности для металла и шлака:

$$\rho_{\text{эф}} \cdot C_{\text{эф}} \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + V_H \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial z} \right); \quad (1)$$

а также краевые условия к уравнению теплопроводности:

–начальные условия:

$$T_M(z, 0) = T_M^0; T_{\text{ш}}(z, 0) = T_{\text{ш}}^0; \quad (2)$$

–граничные условия:

граница «металл-шлак»:

$$T_M = T_{\text{ш}}; \quad (3)$$

$$-\lambda_M^{\text{эф}} \frac{\partial T_M}{\partial z} = -\lambda_{\text{ш}}^{\text{эф}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial z}; \quad (4)$$

–основание рафинировочной емкости:

$$-\lambda_M \frac{\partial T_M}{\partial z} = 0; \quad (5)$$

граница «шлак-атмосфера»:

$$-\lambda_{\text{ш}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial z} = \alpha(T_{\text{ш}} - T_{\text{атм}}) + \varepsilon_{\text{пр}}^{\text{ш-атм}} C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{ш}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{атм}}}{100} \right)^4 \right], \quad (6)$$

Здесь: $T_M(z, \tau)$; $T_{\text{ш}}(z, \tau)$ – распределение абсолютной температуры в расплавах металла и шлака; $\rho_{\text{эф}}, C_{\text{эф}}, \lambda_{\text{эф}}$ – эффективные значения их плотности, удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности, рассчитываемые с учётом объёма аргонной фазы; τ - время; $T_M^0, T_{\text{ш}}^0$ – начальные значения распределения абсолютной температуры металла и шлака; α - коэффициент теплоотдачи шлака в атмосферу; $T_{\text{атм}}$ – абсолютная температура атмосферы; $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{ш-атм}}$ – приведенная степень черноты шлака; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Математическая модель теплового процесса реализована по методу конечных разностей. В рассматриваемом приближении принималось, что среднее значение скорости расплава в ковше во время его наполнения металлом равно скорости V_H этого наполнения.

На графике рис.1, построенного на основе численного исследования теплового процесса, показана зависимость потери средней температуры расплава железа в функции удельного расхода аргона при различных коэффициентах теплопроводности

шлака. Как следует из графика, повышение коэффициента теплопроводности шлака приводит снижению теплосодержания металла.

Таким образом, при выборе шлака, покрывающего поверхность металла, необходимо учитывать величину коэффициента его теплопроводности.

Вдувание в жидкий металл аргона, начальная температура которого равна температуре атмосферы, снижает температуру расплава в ковше. При этом, увеличение теплосодержания аргона равно в рассматриваемом приближении снижению энтальпии металла. Таким образом, уравнение теплового баланса имеет вид:

$$\dot{m}_{Ar} \cdot \tau_{пр} \cdot c_p^{Ar} \cdot \Delta T_{Ar} = -M_m \cdot c_m \cdot \Delta T_m. \quad (7)$$

Здесь: M_m – масса металла в ковше; c_m – его удельная теплоемкость; ΔT_m – величина изменения средней температуры металла за время $\tau_{пр}$ продувки; ΔT_{Ar} – величина повышения средней температуры аргона при входе в расплав; $\dot{m}_{Ar}$ – массовый расход инертного газа; c_p^{Ar} – его удельная теплоемкость в условиях гидростатического давления расплава в районе локализации пор продувочного устройства.

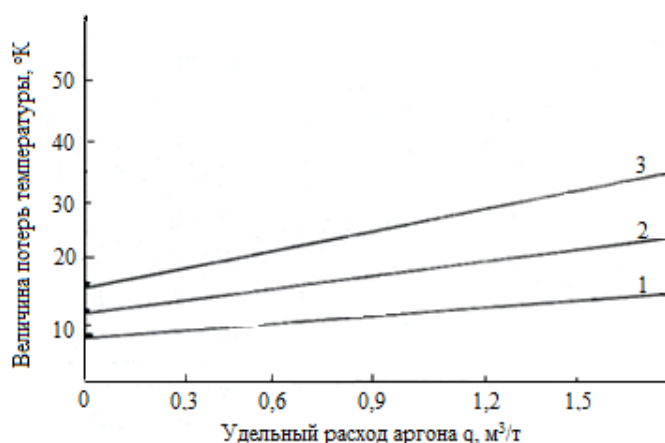


Рис. 1. Зависимость величины потери средней температуры расплава железа от удельного расхода аргона и коэффициента теплопроводности шлака: 1 – $\lambda_{ш} = \frac{\lambda_m}{10}$; 2 – $\lambda_{ш} = \frac{\lambda_m}{5}$; 3 – $\lambda_{ш} = \frac{\lambda_m}{3}$

Таким образом:

$$\Delta T_m = -\dot{m}_{Ar} \cdot \tau_{пр} \cdot c_p^{Ar} \cdot \frac{\Delta T_{Ar}}{(M_m \cdot c_m)}, \quad (8)$$

Следовательно, снижение средней температуры расплава металла в ковше прямо пропорционально массовому расходу аргона (или интенсивности продувки) и времени продувки, но обратно пропорционально массе расплава в ковше и начальной температуре аргона (до входа в металл).

При расчете данных для графика рис.1 принимались следующие значения: $c_p^{Ar} = 519$ Дж/кг · град; $c_m = 610$ Дж/кг · град; $\Omega = 0,005$ м³/с; $\Delta T_{Ar} = 1650^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 1630^\circ\text{C}$; $R = 0,5$ м; $H = 1,0$ м; $q = \Omega \cdot \tau_{пр} / M_m$.

Здесь: R – радиус ковша с металлом; H – уровень заполнения ковша расплавом; Ω – общий объемный расход аргона (интенсивность продувки); q – удельный расход аргона.

Взаимосвязь массового и объемного расхода для рис. 1 определялась по методике монографии [8]. Математическая постановка задачи тепломассопереноса включает,

кроме уравнения теплопроводности, также и уравнение диффузионного процесса частиц удаляемого из жидкого металла газа, изложенного авторами в статье [7].

На рис.2 построен график зависимости эффективности ϵ конвективной диффузии азота в расплаве железа (степени его дегазации), в функции интенсивности Ω продувки аргоном через «пористое кольцо» в днище при различных значениях диаметра d_n пор продувочного устройства.

Как следует из этого графика, при увеличении интенсивности продувки эффективность ϵ возрастает вследствие увеличения количества пузырей аргона, внедряемого в жидкую ванну в единицу времени. Однако, при некотором оптимальном значении $\Omega = \Omega_{\text{опт}}$ ϵ достигает максимума и дальнейший рост этой величины прекращается. Существование $\Omega_{\text{опт}}$ связано с наличием противоположной тенденции увеличению площади поверхности контакта «аргон-металл» при росте Ω , а именно, снижению времени контакта пузырей аргона с жидкой ванной, вследствие чего рафинирующая способность каждого из пузырей уменьшается. Следовательно, режим продувки при $\Omega = \Omega_{\text{опт}}$ является энергоресурсосберегающим.

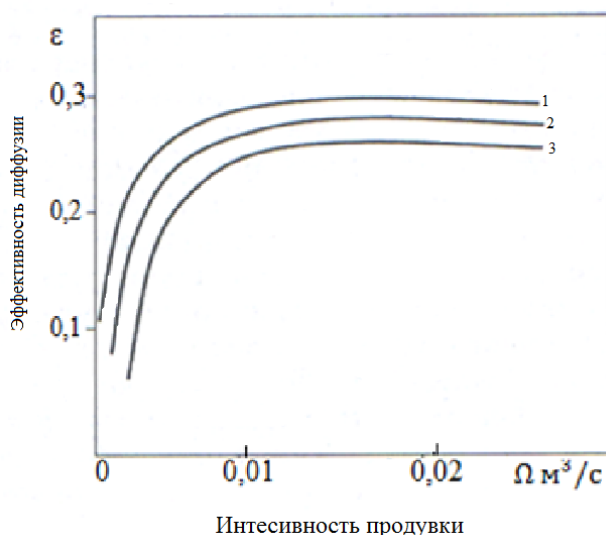


Рис. 2. Зависимость эффективности ϵ конвективной диффузии азота в расплаве железа от интенсивности продувки по завершению слива расплава в ковш:
1- $d_n=0,1$ см; 2- $d_n=0,2$ см; 3- $d_n=0,3$ см

Зависимость $\epsilon(d_n)$ является убывающей, так как при снижении диаметра пор продувочного устройства при фиксированном значении $\Omega = \Omega_{\text{опт}}$ площадь поверхности контакта «аргон – металл» возрастает [2]. При этом, как показали исследования, массовый расход аргона для обеспечения $\Omega_{\text{опт}}$ снижается с уменьшением d_n .

На рис. 3 построен график зависимости ϵ от длительности продувки после наполнения ковша расплавом.

Из этого графика следует, что продувка жидкой ванны с оптимальной интенсивностью в этот период менее эффективна (рост ϵ менее значителен). Это связано со снижением интенсивности перемешивания металла ввиду прекращения воздействия в этот период на расплав струи металла, падающей из плавильной печи. Вместе с тем снижение ϵ в этот период менее заметно, чем в случае распределения пор по всему днищу ковша [7,10] так как существование «пористого кольца» является дополнительным перемешивающим фактором при продувке аргоном.

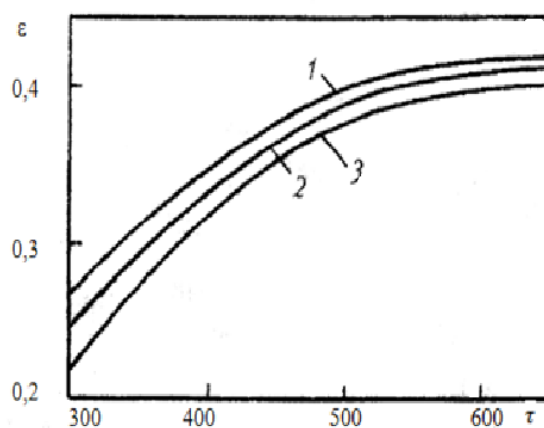


Рис. 3. Зависимость эффективности конвективной диффузии азота в металле от времени продувки после заполнения ковша расплавом: 1 – $[S] = 0,025\%$; 2 – $[S] = 0,030\%$; 3 – $[S] = 0,035\%$.

$$\tau_{\text{вып}} = 300 \text{ с}; \Omega_{\text{опт}} = 0,015 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}; d_n = 0,3 \text{ см.}$$

Для установления адекватности разработанной математической модели проведем сравнение ее результатов с количественными данными лабораторных исследований японских авторов [11] и нашими данными «холодного» моделирования (рис. 4).

Работа [11] посвящена дегазации расплава железа от растворенного азота продувкой аргоном. Поэтому, в порядке установления адекватности разработанной математической модели в нашу компьютерную программу закладывались данные лабораторного эксперимента [11]. Сопоставление кривых лабораторных (1) и наших расчетных (2) результатов говорит об их удовлетворительном согласовании.

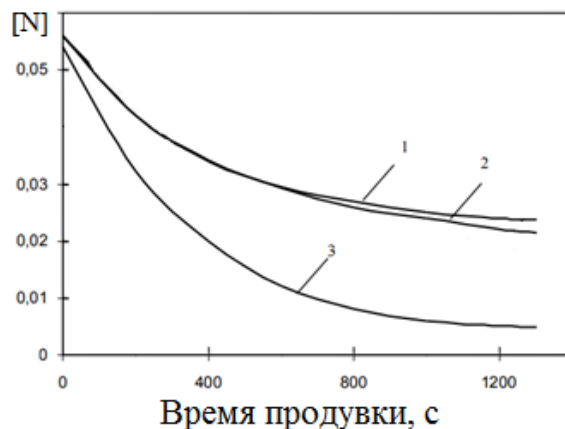


Рис. 4. Зависимость концентрации азота в расплаве железа от времени продувки $H=5,4 \text{ см}; d_n = 0,1 \text{ см}; \Omega_{\text{опт}} = 1,43 \frac{\text{см}^3}{\text{с}}; M=376 \text{ г}; [S]=0,052\%; [O]=0,028\%; [C]=0,0\%$.

При этом качественное поведение кривых идентично. Расхождение в количественном отношении не превышает $\sim 5\%$ и объясняется известным отклонением системы «железо – азот» от состояния термодинамического равновесия, положенного в основу построения математической модели. Кривая (3) графика соответствует результатам математического моделирования процесса дегазации в условиях пренебрежения наличием в расплаве поверхностно-активных серы и кислорода. Как следует из относительного сопоставления кривых графика, учет адсорбции этих

элементов поверхностью пузырей аргона дает результат, который значительно лучше согласуется с экспериментальными данными.

С целью правильного выбора «холодной» модели рассматриваемой многопараметрической технологии, проведем следующий критериальный анализ.

В соответствии с теорией подобия, технология внепечной дегазации жидкого металла всплывающими пузырями аргона в стационарном гидродинамическом режиме может быть охарактеризована следующим минимальным набором определяющих критериев:

$$Eu = \frac{P_0}{\rho_{\text{ж}} \cdot U^2}; We = \frac{\sigma_{\text{ж}}}{L \cdot P_0}; Re = \frac{U \cdot L}{\nu_{\text{ж}}}. \quad (9)$$

Здесь P_0 , L , U – масштабы гидростатического давления в жидкой ванне, ее уровня и скорости всплывания в ней пузырей аргона; $\nu_{\text{ж}}$, $\sigma_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{ж}}$ – кинематическая вязкость, поверхностное натяжение и плотность жидкости.

Введем масштабные коэффициенты:

$$m_L = \frac{L_H}{L_M}; m_p = \frac{P_{0,H}}{P_{0,M}}; m_{Re} = \frac{Re_H}{Re_M}, \quad (10)$$

где индексы «Н» и «М» относятся соответственно к натуральному объекту и его модели.

Условия подобия гидродинамических процессов запишется в виде:

$$\frac{P_{0,H}}{\rho_{\text{ж},H} \cdot U_H^2} = \frac{P_{0,M}}{\rho_{\text{ж},M} \cdot U_M^2}; \frac{\sigma_{\text{ж},H}}{L_H \cdot P_{0,H}} = \frac{\sigma_{\text{ж},M}}{L_M \cdot P_{0,M}}; m_{Re} = 1, \quad (11)$$

Производя математические выкладки, можно получить:

$$m_L = \left(\frac{\sigma_{\text{ж},H} \cdot \rho_{\text{ж},M}}{\sigma_{\text{ж},M} \cdot \rho_{\text{ж},H}} \right)^{\frac{1}{2}}, m_p = \left(\frac{\sigma_{\text{ж},H} \cdot \rho_{\text{ж},H}}{\sigma_{\text{ж},M} \cdot \rho_{\text{ж},M}} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Если в качестве модельной жидкости взять воду, заменяющую расплав металла, то значения теплофизических коэффициентов будут иметь значения:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{ж},H} &= 6,9 \text{ г/см}^3; \rho_{\text{ж},M} = 1,0 \text{ г/см}^3; \\ \sigma_{\text{ж},H} &= 1600 \text{ эрг/см}^2; \sigma_{\text{ж},M} = 73 \text{ эрг/см}^2; \\ \nu_{\text{ж},H} &= 0,8 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}; \nu_{\text{ж},M} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}. \end{aligned}$$

В этом случае масштабные коэффициенты выразятся значениями:

$$m_L = 1,8; m_p = 12,7. \quad (12)$$

Разработанная лабораторная установка – это прямо- и противоточный реактор, изготовленный из плексиглаза и представляющий собой цилиндрическую емкость высотой 0,5 м и диаметром 0,132 м. Днище реактора выполнялось двойным с воздушной коробкой. Верхнее днище-аналог «пористого кольца», ограниченного радиусом R в диапазоне $\left[\frac{R}{2}; \frac{3R}{2}\right]$, в виде дырок диаметром 1 мм в днище емкости. Часть воздухопровода, который контактирует с «пористым кольцом», выполнена в виде расширяющейся воронки. К воздушной коробке присоединялся коллектор, по которому подавался воздух для продувки водяной ванны в режимах прямо- и противотока. В последнем случае, для интенсификации процессов конвективной диффузии в ванне, продувка совмещалась со сливом воды в реактор из водопроводного крана. По завершению наполнения реактора жидкостью наступает режим прямотока.

Коллектор воздушного дутья через ротаметр соединялся с ресивером воздушного компрессора. Давление, создаваемое компрессором, составляло 3-5 атм. и поддерживалось автоматически специальным регулятором. Расходомер фиксировал интенсивность продувки в диапазоне $0,0 - 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. При моделировании конвективной диффузии из жидкости к всплывающим пузырям воздуха в качестве вещества, растворенного в воде, использовали хлор. Концентрацию хлора определяли методом титрования воды метилоранжем в кислой среде.

В исследованиях использовалась лабораторная установка, изображенная на рис. 5.

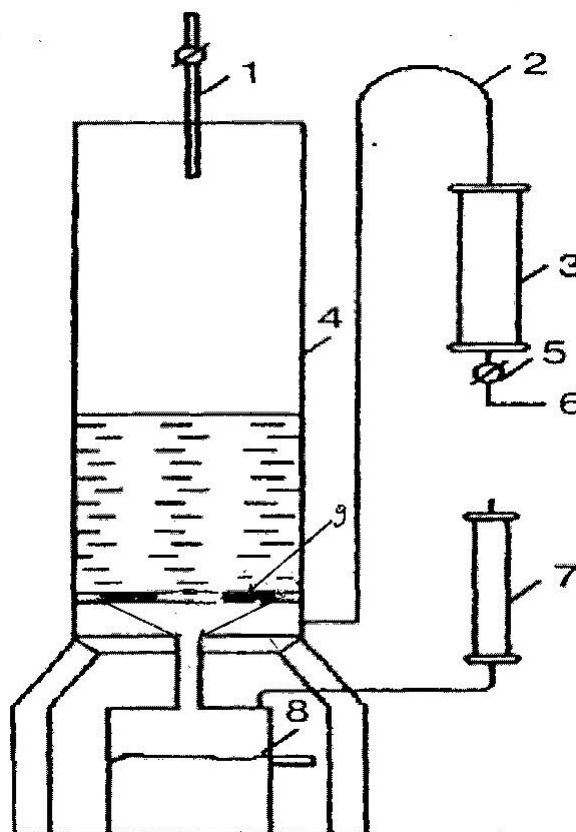


Рис. 5. Модель лабораторной установки: 1 – водопровод; 2 – воздухопровод; 3, 7 – ротаметры; 5 – кран; 6 – магистраль; 8 – отстойник; 9 – «пористое кольцо».

В соответствии с параметрами разработанной «холодной» модели значения масштабных коэффициентов оказались близкими своим теоретическим значениям:

$$m_L = 2,0 \text{ (вместо 1,8); } m_P = 13,8 \text{ (вместо 12,7); } m_{Re} = 1,12 \text{ (вместо 1,0).}$$

Таким образом, можно утверждать, что гидродинамическая структура течения в лабораторных условиях и математической модели, отражающей реальную технологию близки друг другу. В обоих вариантах режим продувки должен быть пузырьковым, а не струйным или переходным.

Вместе с тем коэффициенты диффузии хлора в воде и атомов азота в расплавах различных металлов и, соответственно, значение диффузионного критерия Прандтля различны. Например, для азота в жидком железе:

$$(Pr_D)_H = \frac{\nu_{ж, H}}{D_N} = \frac{1,0 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}}{3,7 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}} = 2,7;$$

Для хлора в воде:

$$(Pr_D)_M = \frac{\nu_{ж,М}}{D_{Cl}} = \frac{0,8 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}}{0,14 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}} = 570.$$

Поскольку гидродинамическая структура течения определяет характер конвективной диффузии в жидкой ванне, то несмотря на различие коэффициентов диффузии хлора в воде и атомов азота в расплавах различных металлов (различие диффузионных критериев Прандтля) можно утверждать о качественно (не количественно) идентичном поведении кривых графиков диффузионных зависимостей. Аналогичной точки зрения придерживается проф. И.И. Борнацкий [2].

Экспериментальным путем исследовалась зависимость эффективности ε конвективной диффузии хлора в водяной ванне в функции основных параметров: $F_0, \tau, V, \beta = D/\delta(U)$. Здесь F_0 – площадь межфазной поверхности «вода – поверхность пузырей воздуха»; τ – время продувки; V – объем жидкой ванны; β – коэффициент массопередачи; D – коэффициент диффузии хлора в воде; U – средняя скорость всплывания пузырей воздуха в жидкой ванне; δ – толщина диффузионного пограничного слоя на этой межфазной поверхности.

Комплексный безразмерный параметр эффективности конвективной диффузии представлен в виде:

$$Z = \frac{\beta \cdot F_0 \cdot \tau}{V}, \quad (13)$$

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 6 и 7. Как следует из рис. 6, кривая $\varepsilon(Z)$ содержит три характерные области. В первой области ($Z \leq 2,0$) конвективная диффузия протекает очень интенсивно, что выражается в быстром росте ε . Во второй области $2,0 \leq Z \leq 3,0$ изменение ε незначительно. При $Z \approx 2,5$ наблюдается максимум ε . При $Z > 3,0$ наблюдается снижение ε .

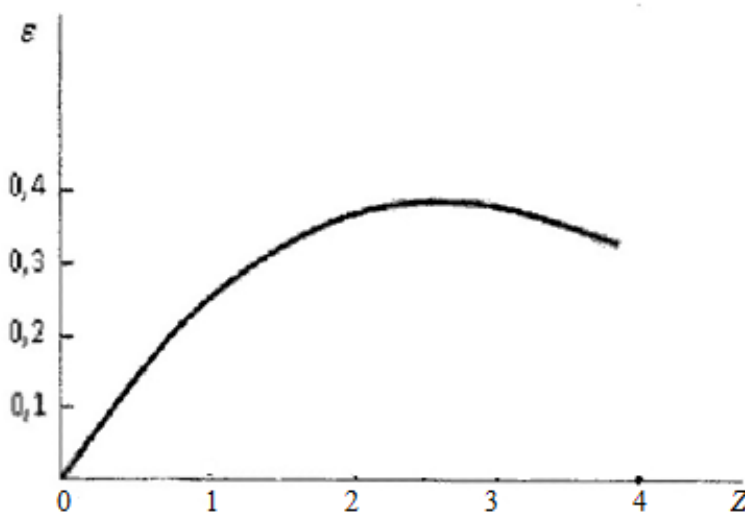


Рис. 6. Зависимость эффективности конвективной диффузии хлора в водном растворе от значений параметра Z

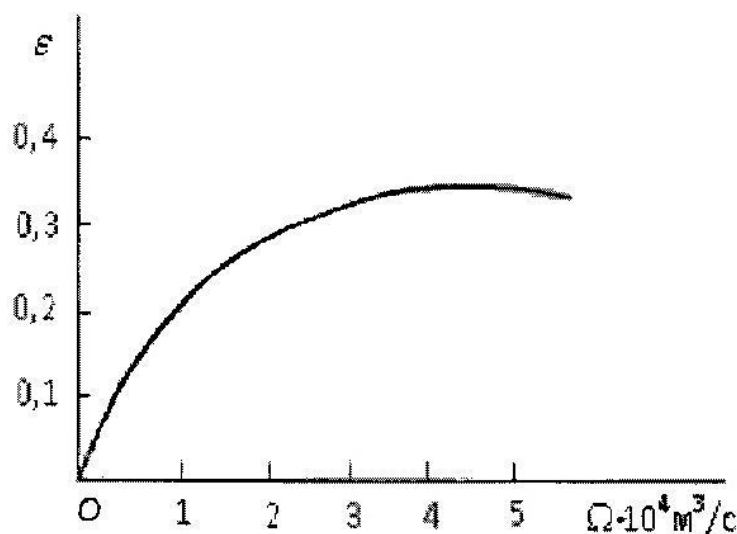


Рис. 7. Зависимость эффективности конвективной диффузии хлора в водном растворе от интенсивности продувки

Графическая зависимость $\varepsilon(Z)$ с использованием метода наименьших квадратов может быть представлена в диапазоне $Z \in [0,0;4,0]$ в виде:

$$\varepsilon = 0,85 \cdot Z - 0,17 \cdot Z^2, \quad (14)$$

Варьируя в этой зависимости интенсивность продувки Ω (через параметр F_0) при фиксированных значениях других параметров, получим график (рис. 7) зависимости $\varepsilon(\Omega)$ по завершению слива воды в реактор.

Как следует из графика, при увеличении интенсивности продувки эффективность ε конвективной диффузии хлора в водном растворе возрастает. Это следует из факта увеличения при этом количества пузырей воздуха, внедряемых в единицу времени в жидкую ванну. Однако, при некотором оптимальном значении $\Omega_{\text{опт}} \approx 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ дальнейший рост ε (по достижению максимума) прекращается. Существование $\Omega_{\text{опт}}$, как излагалось ранее, связано с наличием противоположной тенденции: снижение времени контакта пузырей с жидкой ванной при росте Ω , вследствие чего рафинирующая способность каждого из пузырей уменьшается [2].

При обработке результатов эксперимента использовались данные работ [2,8]:

$$\delta(U) = (rv_{\text{ж}}/U)^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

$$r_0 = (3r_n\sigma_{\text{ж}}/2g\rho_{\text{ж}})^{\frac{1}{2}}, \quad (16)$$

$$U = [gr \frac{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{ж}} + \rho_{\text{г}}} + \frac{\sigma_{\text{ж}}}{r(\rho_{\text{ж}} + \rho_{\text{г}})}]^{\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

Здесь r_0 , r – начальное и среднее значения радиуса всплывающего пузыря; r_n – радиус поры; $\rho_{\text{г}}$ – средняя плотность воздуха в пузырях; g – ускорение силы тяжести.

Варьируя τ в параметре Z при фиксированных значениях других характеристик построен график рис.8, который как и рис. 7 качественно согласуется с результатами математического моделирования

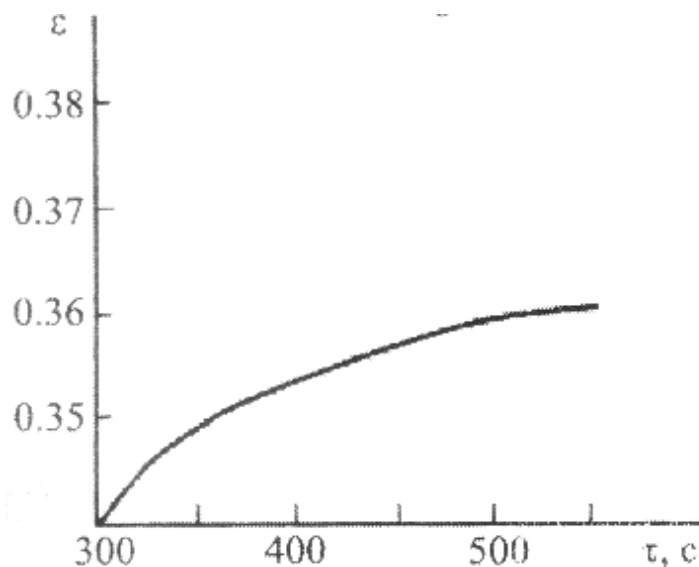


Рис. 8. Зависимость эффективности конвективной диффузии хлора в воде от времени продувки ($\tau \geq \tau_{\text{вып}}=300$ с)

Таким образом, результаты экспериментальных исследований (количественных и качественных) полностью согласуются с соответствующими результатами математического моделирования. Энергосберегающий режим технологии определяется компьютерной программой, построенной на основе разработанной математической модели.

При построении математической модели процессов тепломассопереноса при внепечной дегазации металла от смеси газов (азот, кислород, водород) необходимо учитывать существенно более высокую диффузионную подвижность водорода и кислорода в расплаве в сравнении с азотом.

Идя по пути обобщений и допуская присутствие в жидкой ванне углерода, реакции молидации на границе всплывающих пузырей аргона дополняют соотношениями: $2[\text{H}] = \{\text{H}_2\}$; $[\text{O}] + [\text{C}] = \{\text{CO}\}$.

При этом дополнительное поглощение пузырями аргона молекул водорода и окиси углерода приводит к увеличению поверхности пузырей, что стимулирует и деазотацию металла.

Выводы. Разработана математическая модель процессов тепломассопереноса при внепечной дегазации жидкого металла от растворенного в нем азота продувкой инертным газом через «пористое кольцо» в днище ковша при атмосферном давлении под слоем синтетического шлака. Математическая модель согласуется с данными экспериментальных исследований.

Проведено численное исследование эффективности конвективной диффузии (степени дегазации металла) и теплотеря расплава в функции технологических параметров. Определен энергоресурсосберегающий режим технологии, который достигается путём снижения расхода аргона до уровня оптимума. Это экономит ресурсы теплоэнергетической установки по получению этого инертного газа.

Намечены пути математического моделирования процессов тепломассопереноса при внепечной дегазации металла от смеси газов (азота, кислорода, водорода).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фром, Е. Газы и углерод в металлах / Е. Фром, Е. Гебхардт. – Москва : Металлургия, 1980. – 712 с.
2. Борнацкий, И. И. Внепечное рафинирование чугуна и стали / И. И. Борнацкий, В. И. Мачикин, В.С. Живченко. – Киев : Техника, 1986. – 168 с.
3. Дымнич, А. Х. Вопросы тепломассообмена в сталеплавильных процессах / А. Х. Дымнич, А. А. Троянский. – Донецк : NORD PRESS, 2009. – 582 с.
4. Комолова, О. А. Математическое моделирование процессов внепечной обработки / О. А. Комолова, К. В. Григорович // Современные проблемы электрометаллургии стали : материалы XVII Международной конференции : в 2 ч. / Министерство образования и науки Российской Федерации, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) ; под редакцией В. Е. Рощина. – Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – Ч. 1 – С.73-75.
5. Смирнов, А. Н. Физическое моделирование параметров рафинирования стали в ковше при продувке аргоном / А. Н. Смирнов, А. В. Кравченко, Д. Ю. Кузнецов // Инновационные технологии внепечной металлургии чугуна и стали : Международная научно-техническая конференция. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – С. 17-21.
6. Захаров, Н. И. Энергоресурсосбережение при рафинировании жидкой стали от газов / Н. И. Захаров, А. А. Троянский, А. И. Троцан. – Мариуполь : Полиграфический центр ПГТУ, 2015. – 190 с.
7. Захаров, Н. И. Математическое моделирование конвективной диффузии при внепечной дегазации стали всплывающими пузырями инертного газа / Н. И. Захаров, Ф. В. Недопёкин, А. И. Троцан // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78, № 3. – С. 68-71.
8. Захаров, Н. И. Интенсификация процессов тепломассопереноса при рафинировании жидкой стали от газов / Н. И. Захаров. – Донецк : Цифровая типография, 2016 – 204 с.
9. Камкина, Л. В. Математическое моделирование процессов внепечной обработки стали в ковше с продувкой инертными газами / Л. В. Камкина, А. Г. Величко, А. П. Мешалкин // Инновационные технологии внепечной металлургии чугуна и стали : Международная научно-техническая конференция. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – С. 27-29.
10. Захаров, Н. И. Физическая модель диффузионного взаимодействия пузырей аргона с расплавом алюминия / Н. И. Захаров, И. В. Волкова // Инженерно-физический журнал. – 2017. – Т. 90, № 4. – С. 1036-1039.
11. Masamitsu, T. Rate of nitrogen desorption the molten iron by argon flowing / T. Masamitsu, M. Hiromu, S. Masamichi // Iron and Steel Institute of Japan. – 1986 – Vol. 72, № 3. – P. 419-423.

Поступила в редакцию 02.03.2020 г.

NUMERICAL RESEARCH OF PROCESSES OF HEAT AND MASS TRANSFER IN LADLE DEGASSING THE MOLTEN METAL BY INERT GAS PURGING MODE AND ENERGY SAVING TECHNOLOGY

Zaharov N.I., Birukov A.B., Tupilko I.V., Shatovich V.A.

A mathematical model of heat and mass transfer processes is constructed, which includes an equation of diffusion process in a liquid bath and an equation of thermal conductivity. The first of these equations takes into account the movement of the melt during its discharge from the melting furnace into the ladle as a result of the impact on the liquid bath of the falling jet and the argon bubbles floating in the metal. The second one-dimensional equation considers two areas in contact with each other: metal and slag. At that metal-slag boundary moves upwards due to ladle filling with melt. Dependencies of diffusion process efficiency (degree of metal degassing) and loss of its temperature as a function of technological parameters are built. Recommendations are given on energy saving during implementation of the considered technology, which is achieved by reducing argon consumption to the level of optimum.

Keywords: convective diffusion, thermal conductivity, liquid bath, nitrogen, mathematical model, out-of-furnace degassing, argon blowing intensity, energy saving.

Захаров Николай Иванович

доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая теплофизика» ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
ДНР, г. Донецк.

Zakharov Nikolay Ivanovich

Doctor of Science, professor of technical thermophysics department, Donetsk National Technical University.
DPR, Donetsk.

Бирюков Алексей Борисович

доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая теплофизика» ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: birukov.ttf@gmail.com

Birukov Alexei Borisovich

Doctor of Science, professor of technical thermophysics department, Donetsk National Technical University.
DPR, Donetsk.

Тупилко Ирина Владимировна

аспирант кафедры «Техническая теплофизика» ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
ДНР, г. Донецк.

Tupilko Irina Vladimirovna

Graduate student of technical thermophysics department, Donetsk National Technical University.
DPR, Donetsk.

Шатович Виктория Алексеевна

магистрант кафедры «Техническая теплофизика» ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: shatovichviktoria23@gmail.com

Shatovich Victoria Alekseevna

Master's of technical thermophysics department, Donetsk National Technical University.
DPR, Donetsk.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 628.356+532.51

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭРЛИФТНОГО БИОРЕАКТОРА-ОСВЕТИТЕЛЯ

© 2020 *Нездойминов В.И., Голоденко Н.Н., Заворотный Д.В., Майстренко О.В.*

Методом конечных разностей решена стационарная двумерная задача движения жидкости в эрлифтном биореакторе-осветлителе (аэротенке-осветлителе с затопленной эрлифтной системой аэрации). Учтено образование водоворотной зоны в осветлителе биологического реактора. Построены линии тока и диаграммы распределения модуля и направления скорости в вертикальном сечении эрлифтного биореактора-осветлителя.

Ключевые слова: затопленный эрлифт, эрлифтный реактор, уравнение Навье-Стокса, линии тока, аэротенк-осветлитель.

Введение. Эрлифтные реакторы являются сооружениями, в которых циркуляция и контакт жидкости с газом осуществляется за счет затопленных эрлифтов – полностью погруженных под уровень свободной поверхности жидкости воздушных водоподъемников. Эрлифтные биореакторы находят применение при удалении из отработанных газов дихлорметана, толуола и других летучих органических соединений [1], биологической очистке сточных вод от органических и минеральных загрязнений, осуществлении флотации и т.д. [2-4].

Параметры работы проектируемых сооружений назначаются с учётом особенностей биохимических и гидродинамических процессов, что требует соответствующих обоснований. В настоящее время многими отечественными и зарубежными учёными получены теоретические обоснования гидродинамических параметров биологических реакторов. При помощи методов вычислительной гидродинамики решены задачи по составлению двумерных моделей, определяющих скалярные и векторные поля скоростей в эрлифтных биореакторах [5-8].

Затопленную эрлифтную систему аэрации целесообразно применять в комбинированных сооружениях – эрлифтных биореакторах-осветлителях. Данные сооружения позволяют сократить капитальную стоимость эрлифтных реакторов для биологической очистки сточных вод за счёт их совмещения в одном сооружении с илоотделителями, а также благодаря более высокой гидравлической нагрузке на самообновляющийся взвешенный слой активного ила осветлителя [9].

Схема эрлифтного биореактора-осветлителя приведена на рис. 1. Представленные линии тока показаны условно – на основании наблюдений за экспериментальной моделью. Эрлифтный эффект приводит к образованию в эрлифтном реакторе циркуляционного потока 11, состоящего из восходящего водовоздушного потока 3 внутри затопленного эрлифта и нисходящего потока иловой смеси 10 – с противоположной от аэраторов 4 стороны эрлифтной стенки 2. В результате обтекания нисходящим потоком 10 наклонного козырька 1 в эрлифтном биореакторе-осветлителе возникает водоворотная зона 9. В восходящем потоке 8 водоворотной зоны образуется

взвешенный слой осветлителя, в котором осуществляется освещение иловой смеси. Из нисходящей части водоворотной зоны происходит возврат задержанных в ходе осветления частиц в циркуляционный поток эрлифтного реактора 11 [10].

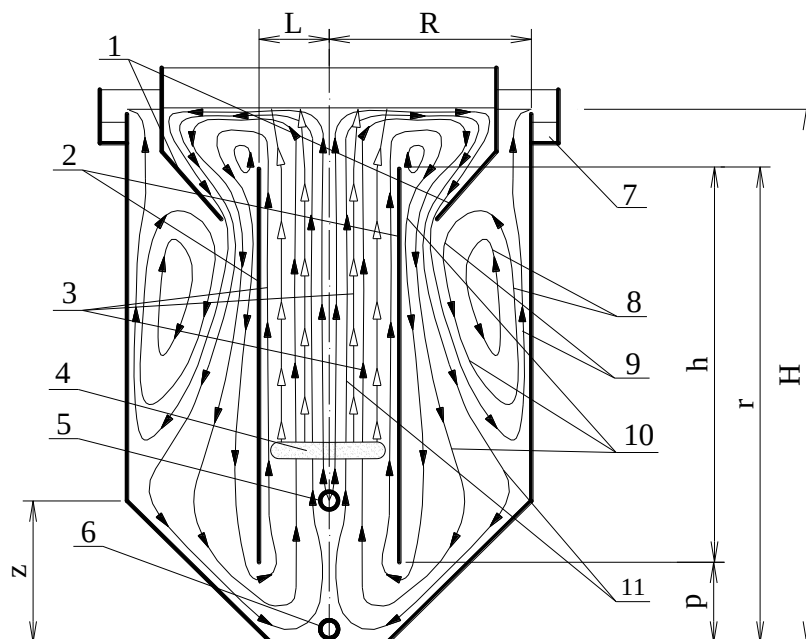


Рис. 1. Схема эрлифтного биореактора-осветлителя с условными линиями тока, построенными на основании наблюдений:

1 – наклонный козырёк; 2 – цилиндрическая стенка затопленного эрлифта; 3 – восходящий водовоздушный поток; 4 – аэраторы; 5 – подача исходной сточной жидкости; 6 – отвод избыточного активного ила; 7 – отвод очищенной жидкости; 8 – восходящий поток осветлителя; 9 – водоворотная зона; 10 – нисходящий поток иловой смеси; 11 – циркуляционный поток эрлифтного реактора.

Постановка задачи. Существующие рекомендации к расчёту гидродинамических параметров эрлифтных биореакторов-осветлителей основываются преимущественно на эмпирических данных [11]. Это делает актуальной разработку математической модели гидродинамики данного сооружения, которая заметно усложняется по сравнению с гидродинамическими моделями эрлифтных биореакторов без илоотделителей [5-8] из-за наличия дополнительной циркуляции – водоворотной зоны 9.

Для математического моделирования гидродинамических процессов в эрлифтном биореакторе-осветлителе используем уравнения Навье-Стокса для вертикальной $\bar{v}$ и горизонтальной $\bar{u}$ составляющих размерных скоростей [12]:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} + \bar{\nu} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2} \right), \quad (1a)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = -\frac{1}{\bar{\rho}} \cdot \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{y}} + \bar{\nu} \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2} \right), \quad (1b)$$

где $\bar{t}$ – время, с;

$\bar{x}, \bar{y}$ – координаты, м;

$\bar{\rho}$ – плотность, кг/м³;

$\bar{\nu}$ – кинематическая вязкость, м²/с;

$\bar{P}$ – давление, Па.

Здесь и далее размерные величины помечены чертой сверху (только те, которые используются и в безразмерном виде).

Имеем два уравнения с тремя неизвестными $\bar{u}$, $\bar{v}$, $\bar{P}$. Чтобы замкнуть систему, к уравнениям Навье-Стокса присоединяют уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = 0. \quad (2)$$

Начальные условия не имеют существенного значения, поскольку производится поиск стационарного решения.

Решение задачи. Продифференцировав (1a) по y и (1b) по x , исключив давление и определив вихрь как:

$$\bar{\zeta} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} - \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}}, \quad (3)$$

получим уравнение переноса вихря:

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{t}} = -\bar{u} \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}} - \bar{v} \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}} + \bar{\nu} \left(\frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}^2} \right). \quad (4a)$$

Это же уравнение в консервативной форме [13], обеспечивающей выполнение интегральных законов сохранения, справедливых для исходных дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial \bar{t}} = -\frac{\partial(\bar{u}\bar{\zeta})}{\partial \bar{x}} - \frac{\partial(\bar{v}\bar{\zeta})}{\partial \bar{y}} + \bar{\nu} \left(\frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial \bar{y}^2} \right). \quad (4b)$$

Определяя функцию тока $\bar{\psi}$ соотношениями:

$$\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{y}} = \bar{u}, \quad \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial \bar{x}} = -\bar{v}, \quad (5)$$

уравнение (3) записываем в виде:

$$\frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{\psi}}{\partial \bar{y}^2} = \bar{\zeta}, \quad (6)$$

где $\bar{\psi}$ – функция тока, м²/с.

Введя безразмерные величины $u = \bar{u} / \bar{U}_0$, $v = \bar{v} / \bar{U}_0$, $x = \bar{x} / \bar{L}$, $y = \bar{y} / \bar{L}$, $\zeta = \bar{\zeta} \cdot \bar{L} / \bar{U}_0$, $t = \bar{t} \cdot \bar{U}_0 / \bar{L}$, приведем уравнения (4b) и (3) к безразмерному виду:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{\partial(u\zeta)}{\partial x} - \frac{\partial(v\zeta)}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y^2} \right), \quad (7)$$

$$\zeta = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}, \quad (8)$$

где $\bar{U}_0$ – характерная скорость, м/с;

$\bar{L}$ – характерный размер;

Re – число Рейнольдса.

Компьютерная программа реализует итерационный процесс метода Гаусса–Зайделя [13]. Направление обхода узлов координатной сетки циклически изменяется, как показано на рис. 2.

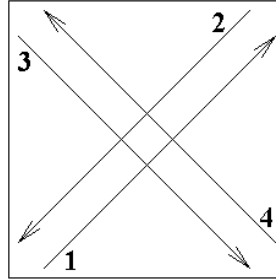


Рис. 2. Последовательность обхода узлов координатной сетки

Уравнение (7) в конечных разностях (верхний индекс при ζ , ψ , u , v – номер шага времени, нижние индексы – номера ячеек: первый (i) – по горизонтали, второй (j) – по вертикали):

при $i \uparrow, j \uparrow$:

$$\begin{aligned} \zeta_{i,j}^{n+1} = & \zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi} (u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta} (v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \\ & + \frac{\tau}{\text{Re}} \left(\frac{\zeta_{i+1,j}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^{n+1}}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^{n+1}}{\eta^2} \right) ; \end{aligned} \quad (9a)$$

при $i \downarrow, j \downarrow$:

$$\begin{aligned} \zeta_{i,j}^{n+1} = & \zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi} (u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta} (v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \\ & + \frac{\tau}{\text{Re}} \left(\frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^n}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^n}{\eta^2} \right) ; \end{aligned} \quad (9b)$$

при $i \uparrow, j \downarrow$:

$$\begin{aligned} \zeta_{i,j}^{n+1} = & \zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi} (u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta} (v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \\ & + \frac{\tau}{\text{Re}} \left(\frac{\zeta_{i+1,j}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^{n+1}}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^n}{\eta^2} \right) ; \end{aligned} \quad (9c)$$

при $i \downarrow, j \uparrow$:

$$\zeta_{i,j}^{n+1} = [\zeta_{i,j}^n - \frac{\tau}{2\xi}(u_{i+1,j}^n \zeta_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n \zeta_{i-1,j}^n) - \frac{\tau}{2\eta}(v_{i,j+1}^n \zeta_{i,j+1}^n - v_{i,j-1}^n \zeta_{i,j-1}^n) + \frac{\tau}{\text{Re}} \left(\frac{\zeta_{i+1,j}^{n+1} - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i-1,j}^n}{\xi^2} + \frac{\zeta_{i,j+1}^n - \zeta_{i,j}^n + \zeta_{i,j-1}^{n+1}}{\eta^2} \right)], \quad (9d)$$

где τ – шаг итераций по времени, с;

$\overline{\eta}$ – шаг координаты по вертикали, м;

$\overline{\xi}$ – шаг координаты по горизонтали, м.

Функцию тока ψ находим итерационным методом Ричардсона [12]:

$$\psi_{i,j}^{k+1} = \frac{1}{2(1+\beta^2)}(\psi_{i+1,j}^k + \psi_{i-1,j}^k + \beta^2 \psi_{i,j+1}^k + \beta^2 \psi_{i,j-1}^k - \xi^2 \zeta_{i,j}), \quad (10)$$

где $\beta = \xi/\eta$ – отношение размеров ячеек сетки.

Задача решается методом последовательных приближений [13]. Компьютерная программа составлена в среде Delphi на языке Object Pascal.

Параметры расчёта различных вариантов приведены в табл. 1. Геометрические параметры назначены исходя из размеров модели биологического реактора-осветлителя. Расчётная область ограничена слева осью симметрии HI (см. рис. 3), справа – внешней стенкой эрлифтного биореактора-осветлителя $GFNI$. На обеих границах функция тока $\psi = 1$. Функция тока на стенке затопленного эрлифта DE $\psi = 0$. Функция тока на разделительной перегородке ABC $\psi = \psi_A$. Вихрь на оси симметрии HI задавался условием скольжения:

$$\zeta_f = 0, \quad (11)$$

Для всех остальных границ – условием прилипания:

$$\zeta_f = 2(\psi_{f+1} - \psi_f)/n^2, \quad (12)$$

где n – расстояние по нормали к стенке от ближайшей к стенке узловой точки $f+1$ до её проекции f на стенку.

Вихрь в вершинах выпуклых углов задавался условием прилипания. В точке (m, r) ребра D верхнего края затопленного эрлифта в разностном уравнении, записанном для узла $(m-1, r)$:

$$\zeta_{m,r} = 2(\psi_{m-1,r} - \psi_{m,r})/n^2, \quad (13)$$

а в разностном уравнении, записанном для узла $(m, r+1)$:

$$\zeta_{m,r} = 2(\psi_{m,r+1} - \psi_{m,r})/n^2. \quad (14)$$

Аналогичным образом задавался вихрь в других угловых точках $(m+1, r)$ рёбер стенки DE затопленного эрлифта, а также в угловых точках A и B козырька AB .

В первом варианте отношение подачи затопленного эрлифта Q к расходу на входе и на выходе Q_1 равно 10. Функция тока на внутренней разделительной перегородке ABC $\psi_A = 1.1$. На входной границе HC функция тока изменяется по линейному закону от $\psi = 1$ в точке H до $\psi_A = 1.1$ в точке C . На выходной границе CG функция тока изменяется по линейному закону от $\psi_A = 1.1$ в точке C до $\psi = 1$ в точке G . Вихрь на входной границе HC :

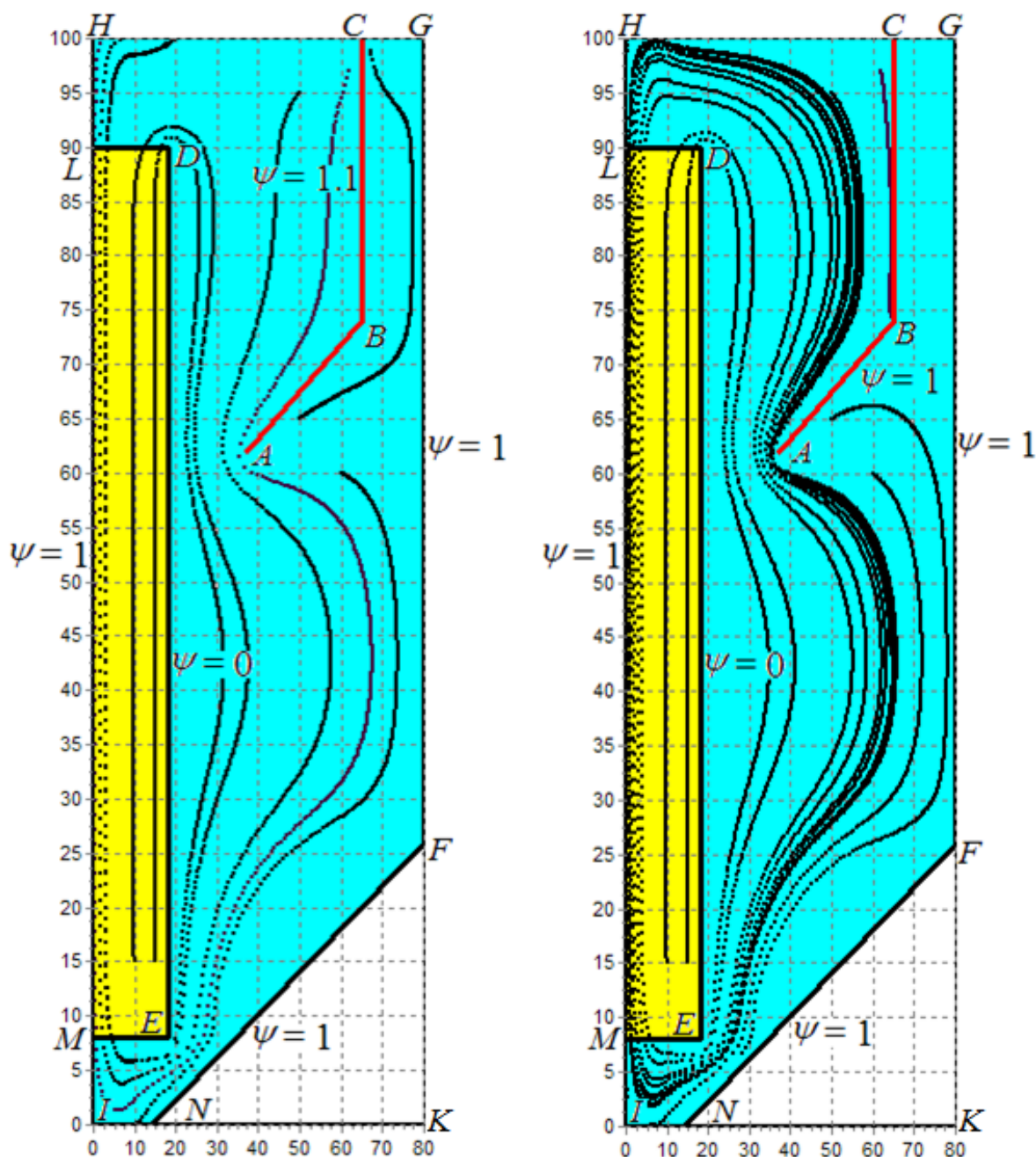
$$\zeta = 0, \quad (15)$$

на выходной границе CG :

$$\zeta_{i,s+1} = \zeta_{i,s-3} - 2\zeta_{i,s-2} + 2\zeta_{i,s}. \quad (16)$$

Таблица 1. Параметры расчёта

Обозначение и наименование параметра	Единица измерения параметра	Значения параметров для различных вариантов		
		Первый	Второй	Третий
$R (HG)$ – радиус биологического реактора	мм	111	111	110
	шаги сетки	80	80	100
$H (HI)$ – рабочая высота биореактора	мм	366	366	370
	шаги сетки	100	100	100
$\bar{L}$ – радиус затопленного эрлифта	мм	25	25	23
	шаги сетки	18	18	23
dx – шаг сетки вдоль оси x	мкм	1388	1388	1100
dy – шаг сетки вдоль оси y	мкм	3660	3660	3700
p – ордината нижнего края стенки затопленного эрлифта	шаги сетки	8	8	10
r – ордината верхнего края стенки затопленного эрлифта	шаги сетки	90	90	90
IN – радиус горизонтальной части дна биореактора	мм	20	20	44
	шаги сетки	14	14	40
$z (FK)$ – высота конической части дна биореактора	мм	96	96	111
	шаги сетки	26	26	30
$A(a, q)$ – координаты нижнего края козырька	шаги сетки	$A(50, 65)$	$A(50, 65)$	$A(40, 60)$
$B(b, c)$ – координаты в шагах сетки верхнего края козырька в месте его соединения с вертикальной перегородкой	шаги сетки	$B(65, 73)$	$B(65, 73)$	$B(80, 75)$
e – относительная погрешность итераций		1/1000	1/1000	1/1000
ν – кинематическая вязкость	мм ² /с	1,06	1,06	1,06
Re – число Рейнольдса в сечении затопленного эрлифта (под аэраторами)		482	482	4761
Fr – число Фруда в сечении затопленного эрлифта (под аэраторами)		0,00021	0,00021	0,0020
ρ – плотность	кг/м ³	1000	1000	1000
Q – расход жидкой фазы потока в затопленном эрлифте	мл/с	20	20	200
Отношение расхода на входе и на выходе из биореактора к подаче жидкости затопленным эрлифтом Q_1/Q	мл/мл	0,1	0	0
h – высота стенки затопленного эрлифта	мм	322	322	296
	шаги сетки	88	88	80
$\bar{U}_0$ – характерная скорость (в затопленном эрлифте)	мм/с	10	10	100
τ – шаг итераций	мкс	4986	4986	404
t_1 – интервал меток времени на линиях тока	мс	500	500	500



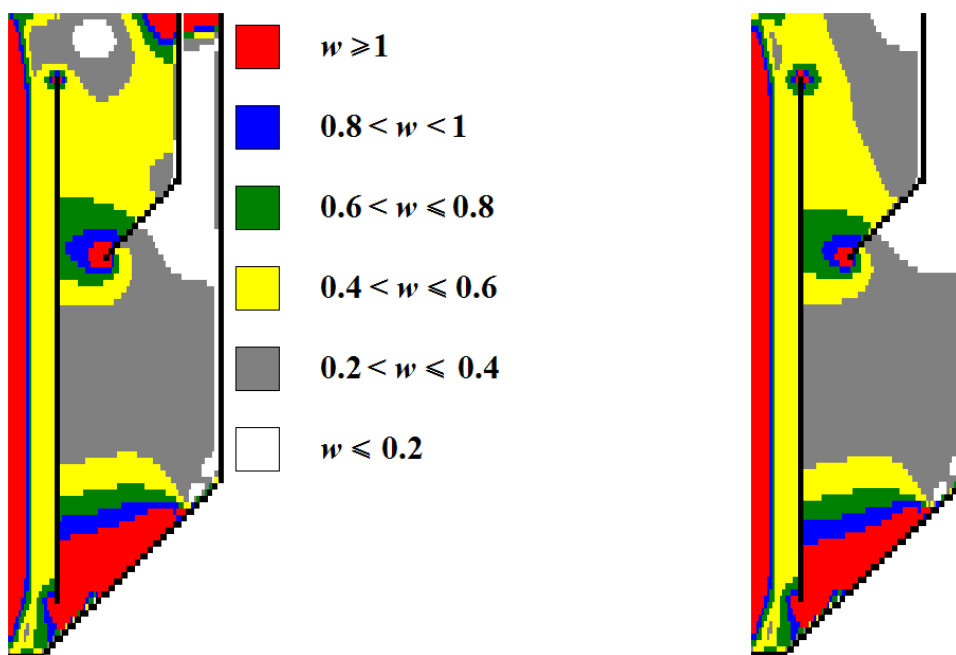
а) Отношение расхода в затопленном эрлифте к расходу на входе и на выходе равно 10

б) Отсутствует поступление и отток

Рис. 3. Линии тока в вертикальном сечении эрлифтного биореактора-осветлителя, проходящем через вертикальную ось симметрии. Интервал меток времени на линиях тока $t_1 = 500$ мс. Приведены граничные условия для функции тока ψ .

Линии тока для первого варианта показаны на рис. 3а, распределение модуля скорости на рис. 4а, а направлений скорости – на рис. 5а.

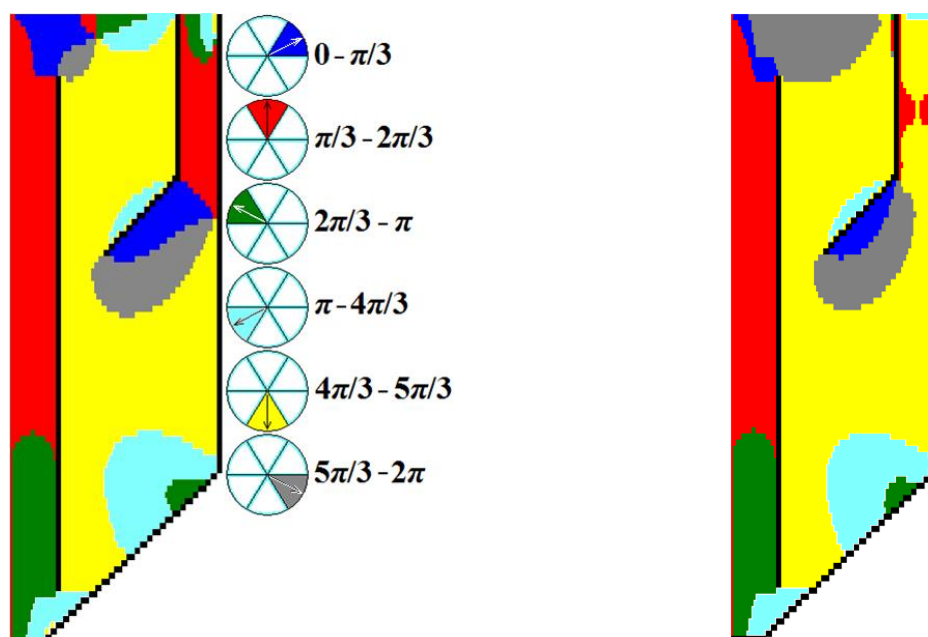
Во втором варианте нет подвода жидкости к биореактору-осветлителю и её отвода. На разделительной перегородке ABC , а также на входной границе HC и выходной границе CG функция тока $\psi = 1$. Параметры расчёта для второго варианта приведены в табл. 1, линии тока показаны на рис. 3б, распределение модуля скорости – на рис. 4б, а направлений скорости – на рис. 5б.



а) Отношение расхода в затопленном эрлифте к расходу на входе и на выходе равно 10

б) Отсутствует поступление и отток

Рис. 4. Распределение модуля скорости $W = \sqrt{u^2 + v^2}$ в вертикальном сечении эрлифтного биореактора-осветлителя, проходящем через вертикальную ось симметрии.



а) Отношение расхода в затопленном эрлифте к расходу на входе и на выходе равно 10

б) Отсутствует поступление и отток

Рис. 5. Распределение направлений скорости $W = \sqrt{u^2 + v^2}$ в вертикальном сечении эрлифтного биореактора-осветлителя, проходящем через вертикальную ось симметрии.

На рис. 3-5 наблюдаются циркуляционный поток, создаваемый затопленным эрлифтом (полусечение затопленного эрлифта – *LDEM*), низкоскоростной восходящий поток непосредственно под козырьком *AB*, а также малоподвижный вихрь в выходном канале *BCG* и подвижный вихрь на самом выходе *CG* при наличии выходного потока. Подтверждено образование под козырьком восходящего потока, способствующего поддержанию взвешенного слоя, однако результаты во многом противоречат экспериментальным данным (рис.1).

Как показали экспериментальные исследования, под козырьком возникает встречная циркуляция – как при обтекании плохообтекаемого тела струёй. Струя имеет поверхность раздела, т.е. внешнюю границу, которая отделяет окружающую жидкость от нисходящей струи. Диффундирующие частицы жидкости проникают через эту границу, создавая в окружающей жидкости вихревые потоки – водоворотную зону. В третьем варианте на всей внешней границе *HCBABCGFNH* функция тока $\psi = 1$. Притока и оттока жидкости нет (см. табл. 1).

В третьем варианте постановки граничных условий мы разделили область задачи на два участка (см. рис. 6): участок *HCBAPNH*, включающий основной циркуляционный поток эрлифтного реактора 11 (см. рис. 1), и участок *CGFPABC*, включающий водоворотную зону под козырьком. Границей раздела этих двух участков служит линия постоянной массы струи *AP* – граница, отделяющая первоначальную массу струи от присоединённой из окружающей жидкости [14]. Функция тока на стенке затопленного эрлифта *DE* $\psi = 0$, на всех остальных границах участка *HCBAPNH* $\psi = 1$, на границах участка *CGFPABC* $\psi = 0$. Поток водоворотной зоны создавался заданием функции тока $\psi = 1$ в области *Rectangle(70, 50, 75, 45)*.

Тангенс угла между вертикалью и линией *AP*, равного половине угла расширения осесимметричной струи, согласно опытным данным [15], принят:

$$\operatorname{tg} \alpha = 3,4 \cdot a = 3,4 \cdot (0,07 \div 0,08) \approx 0,25. \quad (16)$$

Вихрь на большинстве границ задавался условием прилипания (12). На линии симметрии *IN*, на свободных поверхностях жидкости *HC* и *CG*, а также на границе *AP* ставилось условие скольжения (11).

На рис. 6 показаны линии тока в сечении эрлифтного биореактора. На рис. 7 показано распределение модуля скорости $w = \sqrt{u^2 + v^2}$, а на рис. 8 распределение направлений скорости.

Большие значения модулей скорости вблизи границы *AP* циркуляционного потока эрлифтного биореактора и водоворотной зоны должны обеспечивать возникновение поперечных турбулентных пульсаций и, соответственно, обмен частиц между этими потоками.

Полученное решение моделирует поток жидкости в осветлителе, однако для описания вихревого течения приемлемую точность численного решения можно получить только при такой расчётной сетке, ячейки которой меньше самого мелкого вихря. Это требует очень больших затрат расчётного времени и очень больших объёмов машинной памяти [16].

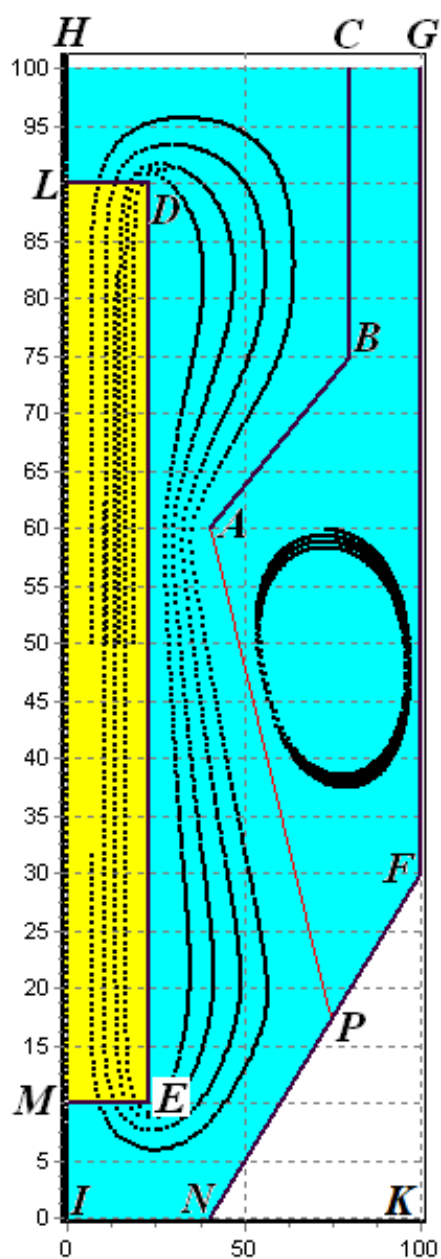


Рис. 6. Линии тока в вертикальном сечении эрлифтного биореактора, проходящем через вертикальную ось симметрии. Линия постоянной массы струи AP разделяет область циркуляции, создаваемой затопленным эрлифтом (полусечение затопленного эрлифта – $LDEM$), и водоворотную зону.

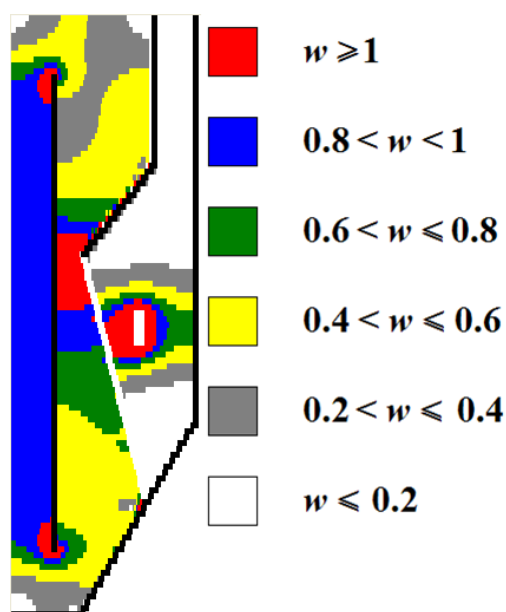


Рис. 7. Распределение модуля скорости $w = \sqrt{u^2 + v^2}$ в вертикальном сечении биореактора-осветлителя, проходящем через вертикальную ось симметрии. Наблюдается вихрь ниже козырька, правее струи

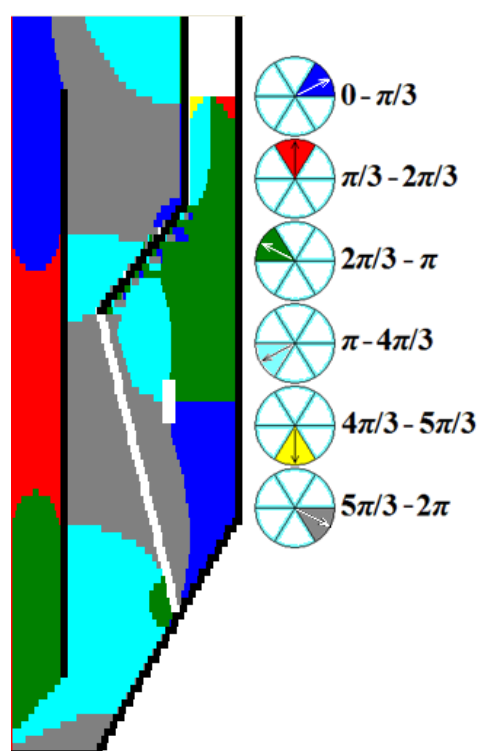


Рис. 7. Распределение направлений скорости $w = \sqrt{u^2 + v^2}$ в вертикальном сечении эрлифтного биореактора-осветлителя, проходящем через вертикальную ось симметрии. Наблюдается дополнительная циркуляция ниже козырька, правее нисходящей струи

Анализ результатов теоретических расчётов по третьему варианту (рис. 6-8) соответствует фактическому характеру движения иловой смеси, наблюдавшемуся на экспериментальной модели эрлифтного биореактора-осветлителя (рис. 1).

Заключение. На базе уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности, методом конечных разностей получено решение стационарной двумерной задачи движения жидкости в эрлифтном биореакторе-осветлителе. Решение позволяет определять горизонтальные и вертикальные составляющие скоростей течения в характерных точках сооружения на основании заданной подачи затопленного эрлифта, с учётом расхода жидкости, поступающей в биологический реактор. Разработанная компьютерная программа позволит оптимизировать размеры эрлифтного биореактора-осветлителя на стадии проектирования.

Анализ результатов расчёта, представленного на графиках рис. 6-8, показывает, что под наклонным козырьком АВ возникает интенсивное вихревое движение жидкости, которое приводит к перемешиванию. Часть восходящего потока водоворотной зоны отклоняется от выходного канала СГ в сторону нисходящего потока эрлифтного биореактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Evaluation on the removal performance of dichloromethane and toluene from waste gases using an airlift packing reactor [Электронный ресурс] / Peilun Xu, YangWei, Nana Cheng et al. // Journal of Hazardous Materials – V. 366, 15.03. – 2019. – Pp. 105-113. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.11.081> (дата обращения: 14.01.2020).
2. Нездойминов В.И. Расчетные зависимости аэротенка с затопленной эрлифтной системой аэрации / В.И. Нездойминов [Электронный ресурс] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры – 2014. - №5 (109). – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnaba_2014_5_14 (дата обращения: 14.01.2020).
3. Soleimani M. Biodesulfurization of refractory organic sulfur compounds in fossil fuels [Электронный ресурс] / M. Soleimani, A. Bass, A. Margaritis // Biotechnology Advances – 2007. – Vol. 25, № 6 – Pp. 570-596. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.07.003> (дата обращения: 18.01.2020).
4. Cozma P. Airlift reactors: Applications in wastewater treatment [Электронный ресурс] / P. Cozma, M. Gavrilescu // Environmental Engineering and Management Journal – 2012. - Vol.11, № 8. – Pp. 1505-1515. – URL: <https://doi.org/10.30638/eemj.2012.189> (дата обращения: 18.01.2020).
5. Al-Mashhadani M.K.H. Airlift bioreactor for biological applications with microbubble mediated transport processes [Электронный ресурс] / M. K. H. Al-Mashhadani, S. J. Wilkinson, W. B. Zimmerman // Chemical Engineering Science – 2015 - Vol. 137. – Pp. 243–253. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.06.032> (дата обращения: 18.01.2020).
6. Лучина А.Ю. Биологическая очистка сточных вод в аэротенках с затопленной пневматической системой аэрации [Электронный ресурс] / А.Ю. Лучина, Ф.В. Недопёкин // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки – 2018. – № 3 (44). – С. 68-75. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37219938> (дата обращения: 22.01.2020).
7. Недопёкин Ф.В. Исследование вертикальных двухфазных течений в аэротенках с пневматической системой аэрации [Электронный ресурс] / Ф.В. Недопёкин, А.Ю. Лучина // Вестник Луганского национального университета им. Владимира Даля – 2017. - №4-2 (6). – С. 41-46. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32615106> (дата обращения: 22.01.2020).
8. Moraveji M.K. CFD simulation of holdup and liquid circulation velocity in a membrane airlift reactor [Электронный ресурс] / M.K. Moraveji, B. Sajjadi, R. Davarnejad // Теоретические основы химической технологии – 2012. – Т. 46, № 3. – С. 311–318. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17726268> (дата обращения: 22.01.2020).
9. Нездойминов В.И. Биологическая очистка городских сточных вод с эрлифтными биореакторами-осветлителями / В.И. Нездойминов, В.С. Рожков, Д.В. Заворотный // Строитель Донбасса. – 2018. № 10 (53) – С. 17-21.
10. Заворотный Д.В. Обеспечение циркуляции иловой смеси в аэротенках-отстойниках со взвешенным слоем [Электронный ресурс] / Д.В. Заворотный, А.В. Жибоедов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2016. – №3 (119). – С. 186-189. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vdnaba_2016_3_38 (дата обращения: 23.01.2020).
11. Permissible parameters for the circulation rate of the sludge mixture in airlift reactor-clarififier with suspended layer [Электронный ресурс] / V. Nezdoimov, D. Zavorotnyi, V. Rozhkov, P. Deminov // MATEC Web of

Conferences – 2018. – Vol. 245. – URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824511009> (дата обращения: 23.01.2020).

12. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
13. Безуглый В.Ю. Численные методы теории конвективного теплообмена / Н.М. Беляев, В.Ю. Безуглый. – Киев–Донецк: Вища школа, 1984. – 176 с.
14. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович – М.: Гос. изд-во физико-матем. лит-ры, 1960. – 715 с.
15. Абрамович Г.Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. / Г.Н. Абрамович – изд. 2-е, доп. – М.: Государственное энергетическое издательство, 1948 – 288 с.
16. Ершов Д.С. Численное моделирование турбулентности гибридными методами RANS/LES. / Д.С. Ершов, С.В. Ершов, А.В. Русанов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005, № 8 (24) – С. 123-126.

Поступила в редакцию 04.02.2020 г.

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF AIRLIFT BIOREACTOR-CLARIFIER

Nezdoiminov V.I., Golodenko N.N., Zavorotnyi D.V., Maistrenko O.V.

A stationary two-dimensional problem of fluid motion in an aerotank-clarifier with a flooded airlift aeration system is solved with the finite-difference method. The formation of a whirlpool in the clarifier of the biological reactor is taken into account. Current lines and a diagram of the distribution of the module and the direction of velocity in a vertical section are constructed.

Keywords: flooded airlift, airlift reactor, Navier-Stokes equation, streamlines, aerotank-clarifier.

Нездойминов Виктор Иванович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
ДНР, г. Макеевка.
E-mail: nezdoiminov_deni@mail.ru

Nezdoiminov Viktor Ivanovich

Doctor of engineering sciences, professor, head of Water Supply, Sanitation and Water Conservation Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
DPR, Makeevka.

Голоденко Николай Никитич

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
ДНР, г. Макеевка.
E-mail: nik_nik_gold@mail.ru

Golodenko Nikolay Nikitich

Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, associate professor of Water Supply, Sanitation and Water Conservation Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
DPR, Makeevka.

Заворотный Дмитрий Викторович

ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
ДНР, г. Макеевка.
E-mail: d.v.zavorotnyi@donnasa.ru

Zavorotnyi Dmytrii Viktorovich

Assistent of Water Supply, Sanitation and Water Conservation Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
DPR, Makeevka.

Майстренко Ольга Викентьевна

старший преподаватель кафедры водоснабжения, водоотведения и охраны водных ресурсов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
ДНР, г. Макеевка.
E-mail: 380501502514@yandex.ru

Maistrenko Olga Vikentevna

Senior Lecturer of Water Supply, Sanitation and Water Conservation Department of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
DPR, Makeevka.

НАМ – 55

Незнающие пусть научатся, а знающие вспомнят еще раз
Античный афоризм

Прежде всего нужны факты, а уж потом их можно перевирать
Марк Твен

1965 г. – НАЧАЛО

Путь в тысячу ли начинается с первого шага
Лао-Цзы

Постановлением Совета Министров Союза Советских Социалистических Республик № 421 от 28 мая 1965 г. за подписью Председателя А.А. Косыгина на базе Донецкого филиала Харьковского государственного университета им. М. Горького организован Донецкий государственный университет.

Далее «Наказом Міністра вищої і середньої спеціальної освіти Української РСР № 410» от 07 июля 1965 г. за подписью Министра Ю. Даденкова во исполнение «Постанови Ради Міністрів УРСР» от 11 июня 1965 г. № 572 организован Донецкий государственный университет в составе 6 факультетов, в т. ч. физического.

Изначально в составе физического ф-та было 3 кафедры:

- кафедра экспериментальной физики – ЭФ, зав. кафедрой доцент ИГНАТЕНКО Петр Иванович – перешла из филиала;
- кафедра физической гидродинамики – ФГД, организована член-корреспондентом АН УССР ПОВХОМ Иваном Лукичом, работавшем ранее в ДонНИИЧерМет и по совместительству в филиале;
- кафедра физики низких температур и радиофизических методов исследований – НТиРФМИ, организована академиком АН УССР ГАЛКИНЫМ Александром Александровичем, директором созданного в 1965 г. Донецкого физико-технического института АН УССР.

Первый декан факультета – доцент КОСАЧЕВСКИЙ Леонид Яковлевич.



Косачевский Леонид
Яковлевич



Галкин Александр
Александрович



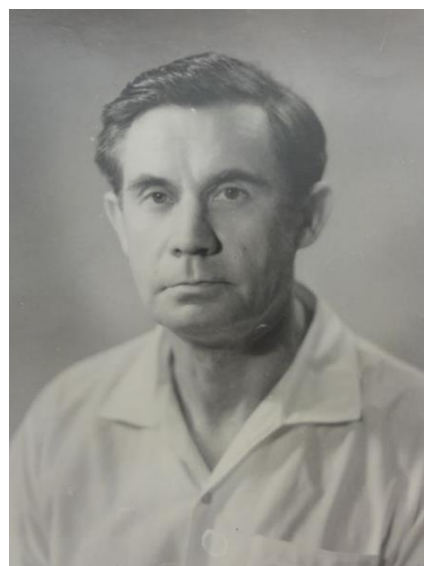
Повх Иван
Лукич



Игнатенко Петр
Иванович



Архаров Владимир
Иванович



Толпыга Кирилл
Борисович

ПЕРИОД СТАНОВЛЕНИЯ – 1966–1975 гг.

Отыщи всему начало, и ты многое поймешь!

Козьма Прутков

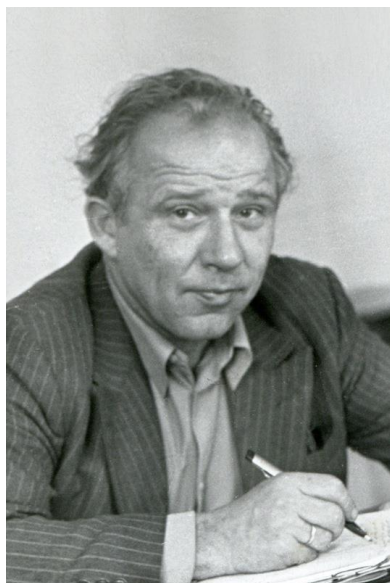
Последующие 10 лет действительно были периодом, когда «строился» ф-т, периодом поисков, проб и ошибок. С точки зрения статистики за этот период успели поработать 6 деканов: Петренко Ю.А., Ковтун Н.М., Шульга В.Г., Повх И.Л., Конев В.Н., Арыдин В.М.

Что касается кафедр, то усилиями руководства ДонФТИ и ДонГУ шел процесс создания новых, их совершенствование. Так, были созданы кафедры рентгенометаллофизики – РМФ (зав. каф. академик АН СССР Архаров В.И.), теоретической физики – ТФ (зав. каф. чл.-корр. АН СССР Толпыго К.Б.), электрорадиотехники и радиоспектроскопии – ЭРТиРС (зав. каф. доц. Ковтун Н.М.); биофизики – БФ (зав. каф. проф. Боргардт А.А.), технических средств и систем управления – ТССУ (зав. каф. проф. Тимошенко Г.М.), общей физики и методики преподавания физики – ОФиМПФ (зав. каф. доц. Арыдин В.М.), математической физики – МФ (зав. каф. доц. Бородин М.А.). При этом самой стабильной и, можно так сказать, факультетообразующей оставалась кафедра физической гидродинамики – ФГД, благодаря энергии, активности и широте научных интересов ее заведующего Повха И.Л.

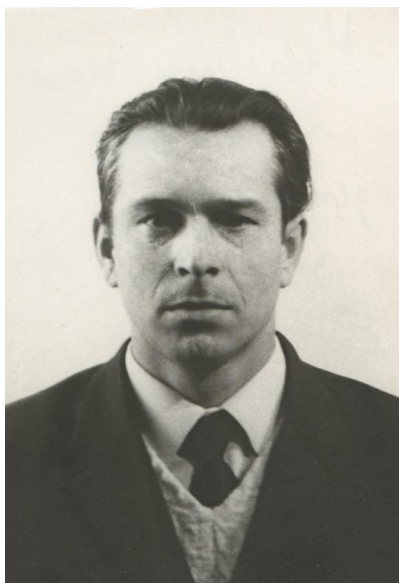
Кафедра БФ, к сожалению, просуществовала всего 3 года, а кафедры ОФиМПФ и МФ были созданы только в 1974-75 гг.

Таким образом, после 1975 г. на ф-те утвердились 9 кафедр: ФГД – Повх И.Л., НТиРФМИ – Самсоненко Н.Д., ЭФ – Яр-Мухамедов, РМФ – Игнатенко П.И., ТФ – Косачевский Л.Я., ЭРТиРС – Шульга В.Г., ТССУ – Мирошниченко В.В., ОФиМПФ – Арыдин В.М., МФ – Бородин М.А.

Декан факультета – доцент Шепилов Николай Александрович.



Петренко Юрий
Александрович



Ковтун Николай
Моисеевич



Шульга Владимир
Гаврилович

Переход к периоду стабильности связан еще и с главенствующей ролью двух специальностей «физика» и «радиофизика», где в подготовке студентов были задействованы все кафедры, большими наборами студентов и сформировавшимися научными направлениями кафедр.

ПЕРИОД СТАБИЛЬНОСТИ – 1976–2014 гг.

Сделал, что мог, пусть другие сделают лучше
И. Ньютон

Можно ли в вообще говорить о стабильности в жизни? Вопрос риторический – слишком много факторов извне влияют на работу как университета, так и факультета.

Однако о фактах. Почти за 40 лет на ф-те сменилось 5 деканов – Шепилов Н.А., Степко М.Ф., Ступин А.Б., Милославский А.Г., Каргин А.А. Для нас это признак стабильной работы.

Одним из важнейших принципов организации научной работы на ф-те стало объединение фундаментальных и прикладных исследований, тесная связь между ними. Фундаментальные, теоретические и поисковые исследования финансировались из госбюджета, а прикладные разработки для предприятий и организаций осуществлялись за счет хозяйственных договоров.

Возрастание объемов исследований и внедрение их результатов привели к открытию в 1980г. специализированного конструкторско-технологического бюро (СКТБ) «Турбулентность». Следующим шагом в этом направлении стала организация учебно-научно-производственного объединения, в которое вошли каф. ФГД, СКТБ и проблемная лаборатория «Физические методы исследования турбулентности», в котором работало около 400 сотрудников.



Коне Виталий
Николаевич



Арыдин Василий
Михайлович



Шепилов Николай
Александрович

В 1991 г. был организован отдел «Физики магнитных явлений и высокотемпературной сверхпроводимости».

Большого рассказа заслуживает студенчество факультета, но это отдельная тема.

Ф-т осуществлял подготовку бакалавров, специалистов и магистров по всем специальностям, на всех кафедрах функционирует магистратура. Учебными и научными базами ф-та традиционно являются ДонФТИ, научно-исследовательский институт комплексной автоматизации и Донецкий государственный центр метрологии, стандартизации и сертификации. Все кафедры оснащены компьютерной техникой. Уровень преподавательского состава на начало нового тысячелетия – 21 % докторов и 44 % кандидатов наук.

За четыре десятилетия произошли измерения и на кафедрах. Так каф. ФГД стала кафедрой физики неравновесных процессов, метрологии и экологии – ФНПМиЭ в связи с открытием новых специальностей. Сложным образом трансформировались и в итоге объединились в единую кафедру нанофизики – НФ кафедры НТиРФМИ, РМФ и ТФ.

Каф. ЭРТиРС стала каф. радиофизики – РФ, каф. ТССУ – каф. компьютерных технологий – КТ, каф. ОФиМПФ стала каф. ОФ и дидактики физики – ОФиДФ, объединившись позднее с каф. ЭФ. И только каф. МФ, как самая молодая, сохранила свое название.

Причин для такого естественного процесса много – это прежде всего развитие научных направлений, появление новых технологий, престижность научных результатов, которые получали новые поколения преподавателей и сотрудников ф-та, воспитанные на этом же ф-те.

Важный фактор – снижение на переломе тысячелетий наборов на специальности ф-та, за исключением компьютерных наук, в связи с падением в обществе престижа специальностей «физика» и «радиофизика». Как писал классик М. Жванецкий «Мало знать себе цену – нужно еще пользоваться спросом». Одним из способов выхода из сложившейся ситуации стало открытие на ф-те специальностей технического профиля, что в итоге привело к смене «вывески» – физический ф-т стал физико-техническим – ФТФ.



Степко Михаил
Филимонович



Ступин Александр
Борисович



Милославский
Александр Григорьевич



Каргин Анатолий
Алексеевич

ПЕРИОД С 2014 г.

Война выгодна бездарным. Талантливым всегда выгодней мир
Михаил Задорнов

Анализировать настоящий период скорее всего рано. Тем более, что военные действия еще продолжаются. Естественно, что внутрифакультетское равновесие было нарушено, признаком чего явилась частая смена деканов (Собко А.Ю., Данилов В.В., Малюк Н.Г., Фоменко С.А.), открытие новых специальностей, большая перестройка учебного процесса.

Следует выразить искреннюю благодарность декану Собко Александру Юрьевичу, который в самый трудный период 2014-2015 гг. сумел сохранить единство и сплоченность ф-та, поддержать работу кафедр.

Сейчас коллектив ф-та проводит большую учебно-методическую и воспитательную работы с целью выхода на новый уровень – аккредитацию всех специальностей в Российской Федерации.



Собко Александр
Юрьевич



Данилов Владимир
Васильевич



Малюк Николай
Григорьевич



Фоменко Сергей
Александрович

Мы должны стать частью перемен, которые мы хотим видеть в мире
Махатма Ганди

Декан физического факультета
с 1995 по 2006 гг., профессор
кафедры теоретической физики
и нанотехнологий, проф.
Милославский А.Г.

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. Корректурa 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.
- **Положение верхнего и нижнего колонтитула относительно края:** 2 см.
- **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 *фамилия(и) и инициалы 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. 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** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку 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:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языке):
 - **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 004.62

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ УЧАСТКОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ

© 2020 Третьяков И.А., Данилов В.В.

В настоящей работе произведена реализация и исследование вычислительных алгоритмов лингвистического описания экспериментальных кривых. Полученная в результате работы алгоритмов классификация находит значительную схожесть с реальной электрокардиограммой.

Ключевые слова: экспериментальные кривые, анализ данных, классификация, лингвистический анализ, python.

Введение. Экспериментальные кривые являются одним из...

Постановка задачи. На этапе сегментации исследуемую кривую разделяют...

Классификация участков экспериментальных кривых. Участки устойчивой формы, регулярно повторяющиеся в процессе события назовем ...

Выводы. Полученный в результате классификации алфавит...

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Третьяков И. А. Методы параллельной сегментации экспериментальных кривых / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 36-41.
2. Data from ECG recording in today's class URL <https://bioelectromagnetism.wordpress.com/2012/11/28/data-from-ecg-recording-in-todays-class/> (дата обращения: 01.09.2019).

Поступила в редакцию xx.xx.2020 г.

ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR LINGUISTIC DESCRIPTION OF THE EXPERIMENTAL CURVE SITES

Tretiakov I.A., Danilov V.V.

In this paper, we have implemented and studied computational algorithms for the linguistic description of experimental curves. The classification obtained as a result of the work of the algorithms finds significant similarity with the real electrocardiogram.

Keywords: experimental curves, data analysis, classification, linguistic analysis, python.

Третьяков Игорь Александрович

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

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Head of laboratory at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of 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:

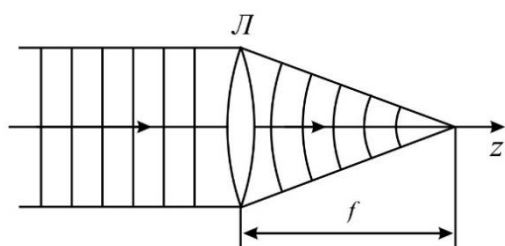


Рис. 1. Действие линзы на плоскую волну

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:

Донецкая Народная Республика 83001, г. Донецк, пр. Театральный, д. 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**

2020. – № 1

Технический редактор: И.А. Третьяков

Адрес редакции:

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР 83001, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24
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 29.05.2020 г.
Формат 60×84/8. Бумага офсетная.
Печать – цифровая. Усл. печ. л. 12,44
Тираж 100 экз. Заказ. №

Издательство ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»
ДНР 83001, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24.
Тел.: +38 (062) 302 92 27.
Свидетельство о внесении субъекта издательской деятельности
в Государственный реестр
серия ДК № 1854 от 24.06.2004 г.