

ISSN 2663-4228

# Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ  
ЖУРНАЛ  
*Основан  
в 1997 году*

---

*Серия Г*  
**Технические  
науки**

---

**3/2018**

---

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

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

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

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

**Члены редколлегии:** д-р техн. наук, доц. **Н.И. Болонов**; д-р техн. наук, проф. **С.А. Горожанкин**; канд. техн. наук, доц. **В.Д. Корень**; 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. Шарий**; канд. техн. наук **Т.В. Ермоленко**; д-р техн. наук, проф. **Ф.В. Недопекин**; д-р. ф.-м. наук, д-р. техн. наук, проф. **В.К. Толстых**; д-р. техн. наук, проф. **Г.В. Аверин** (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Российская Федерация); 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**.

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

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

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

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

**The Members of the Editorial Board:** Dr. of tech., 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. Sharii**; Cand. of tech. **T.V. Ermolenko**; Dr. of tech., prof. **F.V. Nedopekin**; Dr. of phys. and math., Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh**; Dr. of tech., prof. **G.V. Averin** (Belgorod State National Research University, Russian Federation); 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**.

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

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

**E-mail:** [vestnik.donnu.g@donnu.ru](mailto:vestnik.donnu.g@donnu.ru)

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

*Печатается по решению Ученого совета  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»  
Протокол №9 от 30.11.2018 г.*

# Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Серия Г: Технические науки

№ 3

Донецк 2018

---

## СОДЕРЖАНИЕ

---

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

- Моисеев В.В., Сорока В.А., Тимченко В.И.* Фотометрирование освещенности современными источниками света 3
- Третьяков И.А., Белик Т.В.* Технология реализации акустооптических устройств 11

### РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

- Лозинская В.Н., Долгих И.П.* Особенности внедрения SDN-решений в сеть оператора мобильной связи 16
- Бабичева М.В., Попов А.С., Яновский А.В.* Ультразвуковой подавитель микрофонов радиозакладных устройств и диктофонов 24

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Шалаев А.В., Демёхин В.В.* Обработка данных системами искусственного интеллекта при решении логических задач 34
- Бабичева М.В., Юрченко А.С.* Итеративный алгоритм пороговой бинаризации для обработки отпечатков пальцев в биометрических системах доступа 41
- Мартынов М.В., Шарий Т.В.* Автоматическое обнаружение звуковых дефектов в аудиофайлах 47

### ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Симоненко А.П., Асланов П.В., Дмитренко Н.А., Гучмазова Т.К.* Сопротивление трения и теплообмен в турбулентных потоках водных растворов гидродинамически-активных полимеров и поверхностно-активных веществ 56

### ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

- Лучина А.Ю., Недопекин Ф.В.* Биологическая очистка сточных вод в аэротенках с затопленной пневматической системой аэрации 68
- Симоненко А.П., Артемова И.А.* Перспективы практического применения гидродинамически-активных композиций для полимерной локализации токсикантов в литосфере 76
- Правила для авторов 92

# Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997

Series G: Technical science

No 3

Donetsk 2018

---

## CONTENTS

---

### INSTRUMENT ENGINEERING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Moiseev O.I., Soroka V.A., Timhchenko V.I.* Fotometri light modern light sources 3  
*Tretiakov I., Belik T.* The technology of implementation of acousto-optic devices 11

### RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Lozinskaya V.N., Dolgih I.P.* SDN-solutions implementation features in mobile operator's network 16  
*Babicheva M.V., Popov A.S., Yanovsky A.V.* The signal spectrum changes for ultrasonic radiation interaction with nonlinear elements of electrets microphones sound tract 24

### COMPUTER SCIENCE AND COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

- Shalaev A., Demyokhin V.* Processing of data by systems of artificial intelligence in decision of logical problems 34  
*Babicheva M.V., Yurchenko A.S.* The signal spectrum changes for ultrasonic radiation interaction with nonlinear elements of electrets microphones sound tract 41  
*Martynov M.V., Sharii T.V.* Automatic detection of sound defects in audio files 47

### INDUSTRIAL HEAT AND POWER ENGINEERING

- Simonenko A.P., Aslanov P.V., Dmitrenko N.A., Guchmazova T.K.* Resistance of friction and heat transfer in turbulent flows of aqueous solutions of hydrodynamically active 56

### ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN SERVICES

- Luchina A.Y., Nedopekin F.V.* Biological treatment of wastewater in aerotanks with flooded pneumatic aeration system 68  
*Simonenko A.P., Artemova I.A.* Prospects of the practical application of hydrodynamically active compositions for polymer localization of toxicants in the lithosphere 76  
Instructions for authors 92

# 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 502.628 + 620

## ФОТОМЕТРИРОВАНИЕ ОСВЕЩЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА

© 2018 *О.И. Моисеев, В.А. Сорока, В.И. Тимченко*

Проведен сравнительный анализ измерений освещенности, создаваемой различными источниками излучения, светильниками на основе: ламп накаливания (ЛН), люминесцентных (ЛЛ) и светодиодных ламп (СДЛ) в зависимости от частоты излучения, стандартным люксметром

Показано, что изменение природы излучателей в современных осветительных приборах требует оценки не только интегральной освещенности, но и распределения интенсивности света по спектру. Предлагается использовать стандартный люксметр с набором полосовых фильтров. Для реализации поставленной задачи цветовое восприятие при освещении определяется как произведение функции видности  $\Psi(\lambda)$  и  $w(\lambda)$  – спектральной интенсивности излучения. При измерениях освещенности важно использовать методику разделения всего видимого диапазона на участки с помощью полосовых оптических фильтров.

**Ключевые слова:** источники света, цветопередача, фотоприемник, фотометрирование, световая эффективность, качество света

В нашей повседневной жизни большинство населения часто сталкивается с ситуацией, когда естественного освещения недостаточно и нам приходится дополнительно использовать искусственное освещение. Этот свет создается с помощью осветительных приборов, разработанных на основе источников различного типа. Источниками света являются лампы накаливания, дуговые, люминесцентные, галогеновые и светодиодные излучатели. Потребность в дополнительной подсветке возникает не только ночью, но и днем (в некоторых ситуациях). Именно при естественном освещении наша цивилизация развивалась большую часть своего существования и, соответственно, к его характеристикам за многие века адаптировалось зрение человека.

Различные виды искусственного освещения должны полноценно компенсировать людям недостаток солнечного света в темное время суток и зимний период. С другой стороны, слишком яркий свет раздражает сетчатку глаза, вредит зрению и негативно сказывается на психологическом комфорте. От того, насколько правильно освещены места отдыха и работы человека, во многом зависят его здоровье, трудоспособность и общее самочувствие [1].

Из-за важной роли света в нашей жизни любые отклонения уровня и способа освещения могут привести к негативным последствиям. Если подсветка с помощью осветительных приборов выстроена некорректно, можно нанести вред организму:

- создать для работы неблагоприятные условия, что может привести к снижению внимания и, как следствие, травме;
- снижается работоспособность;
- при плохом освещении невозможно хорошо отдохнуть;
- может ухудшиться общее состояние здоровья;

В практической деятельности, при формировании искусственного освещения, используются несколько нормативных документов [2-4], которые регламентируют выбор светильников, их размещение, мощность и т.д. Для каждого случая предусмотрены отдельные нормативы освещения, рассматривающие целевое назначение сооружений, технологические особенности производственного процесса, строительные решения.

Для измерения освещенности обычно используются специальные приборы - люксметры с измерительными преобразователями излучения, имеющими предел допускаемой относительной погрешности не более 10% с учетом погрешности спектральной коррекции, определяемой как отклонение относительной спектральной чувствительности измерительного преобразователя излучения от относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения, погрешности калибровки абсолютной чувствительности и погрешности, вызванной нелинейностью световой характеристики.

Согласно СП 52.13330.2011 [5] «Естественное и искусственное освещение», для искусственного освещения следует использовать энергоэкономичные источники света, отдавая предпочтение при равной мощности источникам света с наибольшей светоотдачей и, возможно, большим, сроком службы. В первую очередь это разнообразные энергосберегающие газоразрядные и люминесцентные лампы. Согласно ГОСТ 6825-91 [6] цветность излучения люминесцентных ламп регламентируется предельно допустимыми отклонениями координат цветности, а для некоторых из них регламентируется относительное распределение светового потока по зонам видимой области спектра, что более правильно определяет качество цветопередачи люминесцентных ламп.

Однако основным контролируемым параметром для всех светильников является электрическая мощность, обеспечивающая достаточную освещенность. В проектных работах и при контрольных замерах проводится также проверки типа освещенности (направленность освещения, равномерность освещенности, насыщенность помещения светом), коэффициент пульсации освещенности, блескость и др

С другой стороны, в фото-, кино- и телевизионной индустриях этих характеристик осветительных установок совершенно недостаточно. Для правильного воспроизведения и передачи цвета объектов важную роль имеет спектральный состав светильников. В действительности излучение искусственных светильников сильно отличается от естественного света. В основном это проявляется в различиях распределения интенсивности излучения по длинам волн и наличии в спектрах узких интенсивных линий.

По нашему мнению, эти отличия следует также контролировать для применения в нормативных разработках. Однако рекомендованные в ГОСТ Р 54944–2012 измерительные приборы (люксметры, радиометры, пульсметры и яркомеры) не предназначены для подобного контроля. Причиной этого является особенности используемого в них фотоприемника. Как правило, приемник реагирует на интегральное излучение (представляемого как освещенность) и изготавливаются на основе полупроводникового материала со своими характеристиками. Поэтому каждый измерительный прибор имеет индивидуальный коэффициент преобразования *свет - электрический ток*, который затем подстраивается к заданным номиналам.

Представляется важным провести анализ изменений в показаниях стандартного люксметра при измерениях освещенности от часто используемых быту и промышленности светильников на основе ламп накаливания (ЛН), люминесцентных

(ЛЛ) и светодиодных ламп (СДЛ). Эта задача является основной целью данной работы. Для проведения сравнительного анализа мы использовали характеристики ЛН с вольфрамовой нитью при  $T=3000\text{K}$ , ЛЛ типа «Colortone 50-C50» для которой производитель заявляет цветовую температуру  $5000\text{K}$  и СДЛ на основе белых светодиодов фирмы Cree. Из люминесцентных специально выбрана лампа с относительно интенсивным излучением в длинноволновой области, которые, как считают, имеют спектр, близкий к солнечному и светодиодная лампа СДЛ. Спектральный состав интенсивности излучения приведен на рис.1.

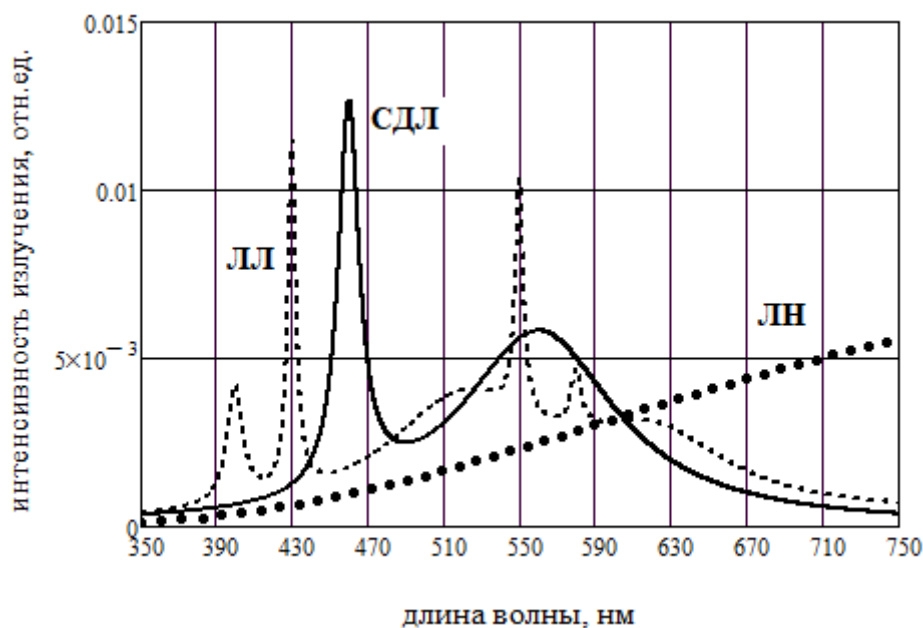


Рис. 1 Спектры излучения ламп накаливания (ЛН), люминесцентных ламп (ЛЛ) и белых светодиодных (СДЛ)

Первое, на что следует обратить внимание источники света на основе ЛЛ и СДЛ содержат достаточно интенсивные узкие линии в коротковолновой части спектра, а, во-вторых, большая доля их излучения также смещена в сторону коротких волн. Что касается ЛН, то на видимую часть спектра приходится малая доля ( $\sim 3\%$ ) полной излучаемой энергии. Поэтому сегодня такие лампы считаются низкоэффективными и некоторые из них промышленность перестала выпускать. Все рассматриваемые спектры сильно отличаются от естественного (солнечного) излучения, которое характеризуется максимумом при  $550\text{nm}$  и высокой долей УФ излучения.

Для анализа спектральных характеристик ламп выбрана видимая часть оптического диапазона от  $350$  до  $750$  нм, а интегральные интенсивности излучателей

$$P = \int_{350}^{750} w(\lambda) d\lambda$$
, где  $w(\lambda)$  – спектральная интенсивность излучения. Величины  $P$  могут быть ассоциированы с освещенностью от каждого типа светильников с характеристиками, представленными на рисунке, и выбраны одинаковыми. Наша задача провести сравнение восприятия света от этих источников для глаза и по показаниям (отсчету) фотоприемника с известными спектральными чувствительностями.

В работе не рассматриваются явления, связанные с распространением излучения в воздушной среде и процессы, связанные рассеянием, отражением, поглощением и т.д. Будем учитывать только прямое воздействие света на зрение и фотоприемник измерительного прибора.

По теории *цветового зрения* Юнга-Гемгольца (1821-1894) ощущение любого цвета получается смешиванием спектрально чистых излучений красного, зеленого и синего цвета. Эта теория удовлетворительно объясняет наблюдаемые факты и предполагает, что глаз содержит только три типа светочувствительных приемников. Они отличаются друг от друга областями спектральной чувствительности. Красный свет воздействует преимущественно на приемники первого типа, зеленый - второго, синий - третьего. Сложением излучений таких трех цветов в различных пропорциях можно получить любую комбинацию возбуждения всех трех типов светочувствительных элементов, а значит и ощущение любого цвета.

Максимальная чувствительность глаза при дневном свете достигается на длине волны 555 нм, а при сумеречном свете - на длине волны 510 нм, как показано на рис.2. Максимальная чувствительность глаза в обоих случаях принята за единицу.

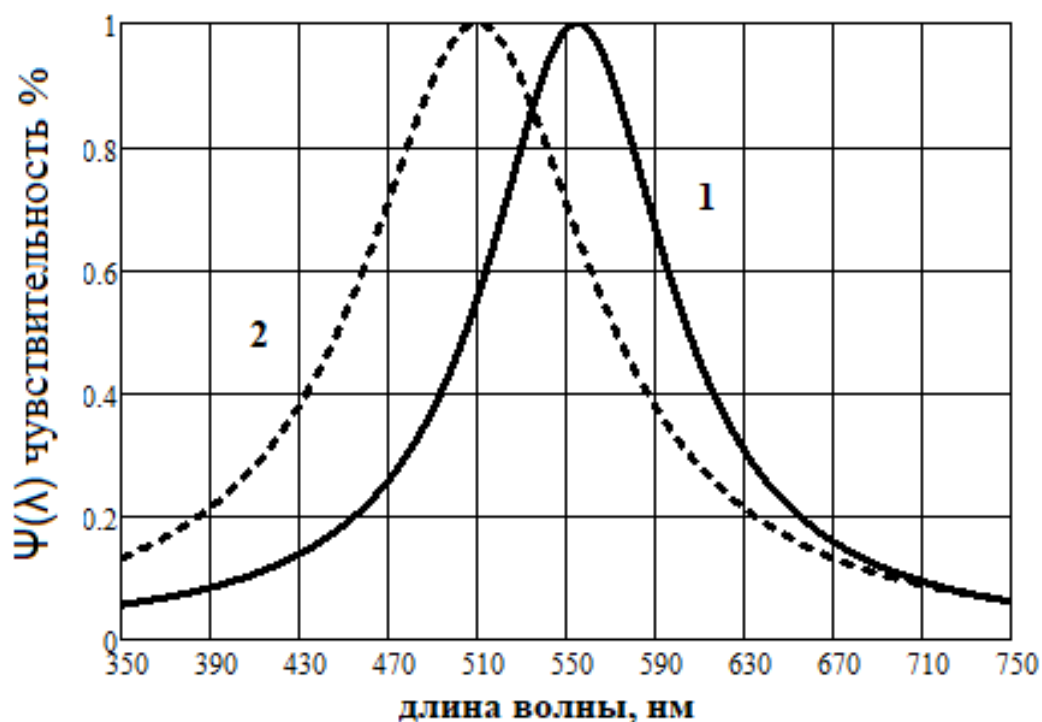


Рис. 2. Кривые видности  $\Psi(\lambda)$  для дневного (1) и сумеречного (2) зрения среднего человека

Отличие между этими двумя кривыми видности объясняется тем, что дневной и сумеречный свет воспринимаются различными рецепторами глаза (палочками при сумеречном свете и колбочками при дневном свете). Как мы можем видеть из кривой видности, глаз способен воспринимать свет на длинах волн примерно от 400 нм до 760 нм. В условиях адаптации к темноте глаз может также немного видеть инфракрасный свет с длиной волны до 950 нм и ультрафиолетовый свет с длиной волны не меньше 300 нм. Границы частотного диапазона видимого света, а также сама форма кривой видности человеческого глаза были сформированы в процессе длительной эволюции, приспособившись к условиям освещения земных предметов солнечным светом, а также



к условиям сумеречного и ночного освещения. Для реализации поставленной задачи можно определить цветовое восприятие при освещении как произведение функции видности  $\Psi(\lambda)$  и  $w(\lambda)$  – спектральной интенсивности излучения [7].

С целью упрощения анализа выберем только чувствительность глаза при сумеречном зрении. В результате зрительное восприятие освещенности примет вид, представленный на рис.3.

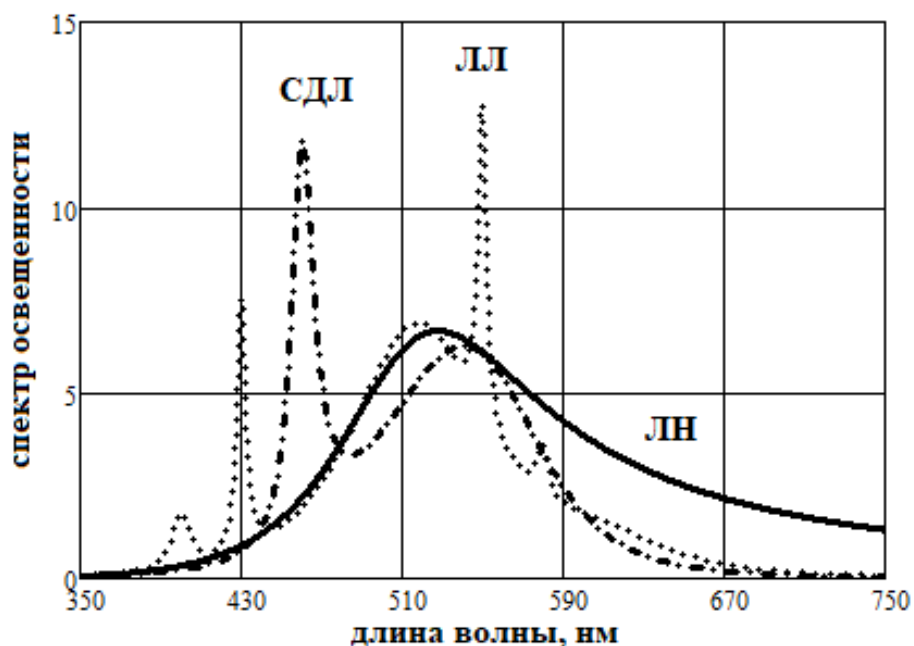


Рис. 3. Спектры освещенности при сумеречном зрении для ламп накаливания (ЛН), люминесцентных ламп (ЛЛ) и белых светодиодных (СДЛ)

Из полученных спектров цветового восприятия обращает на себя внимание наличие резких и мощных линий для люминесцентных и белых светодиодных ламп, что не является привычным для зрения. В целом по уровню освещенности эти лампы практически не содержат длинноволнового излучения свыше 600 нм.

В практической фотометрии с использованием, как отмечалось выше, люксометров с нашей точки зрения основным элементом является фотоприемник, который выполняет интегрирующего преобразователя полного потока световой энергии в широком оптическом диапазоне. Материалом таких приемников могут различные вещества, но каждый из них имеет свою спектральную чувствительность  $\phi(\lambda)$ . Таких веществ достаточно много, но чаще используются селен, кремний, арсенид галлия и др. Для анализа выбраны селен и кремний. Их спектральные характеристики показаны на рис. 4.

В видимой части спектра чувствительность селена относительно близкая к человеческому зрению и смещена в коротковолновую область, а у кремния максимум чувствительности располагается в ближнем ИК диапазоне и возрастает с увеличением длины волны воспринимаемого излучения. Эти вещества наиболее часто используют для изготовления фотоприемников и, поэтому, рассмотрен результат их взаимодействия с излучением от выбранных источников света, которые представлены на рис.5. Кроме выбранных материалов есть множество других, которые способны

реагировать на свет в видимом диапазоне, но их рассмотрение принципиально картину не изменят.

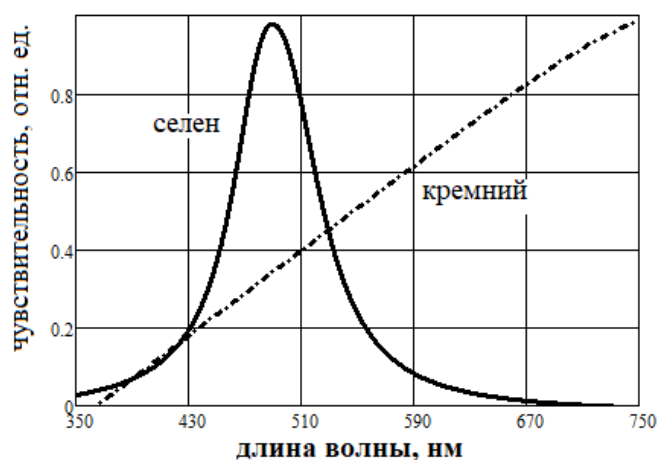


Рис. 4. Спектральная чувствительность селена и кремния в видимой области

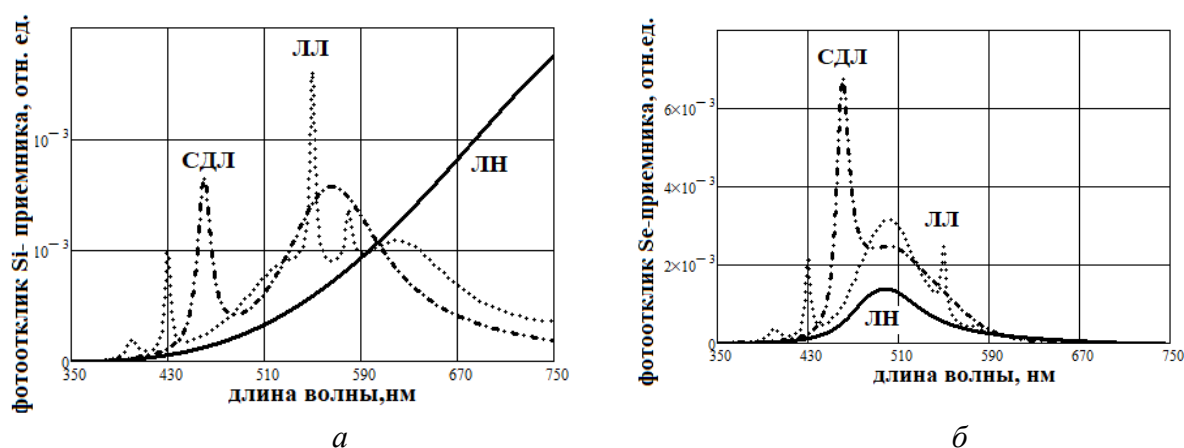


Рис.5. Фотоотклик приемников на основе Si (а) и Se (б) материалов

Кремниевый фотоприемник, проявляя большую чувствительность в красной области, практически не реагирует на острые пики ЛЛ и СДЛ источников в синей части рис.5(а). Поэтому, фотометрирование этих источников по сравнению с ЛН требует корректирующих фильтров. Фотоотклик приборов с селеновыми приемниками рис.5(б) в целом близок к зрительному восприятию, но в связи со смещением характеристических линий 430, 505 и 550нм для ЛЛ и 460нм для СДЛ неадекватно измеряют полную мощность падающего излучения. Этот недостаток легко устраняется корректировкой коэффициента усиления самого прибора. Кроме того, прибор никак не отмечает наличие интенсивного пика при 460нм от СДЛ.

Но установить и измерить изменения в цветопередаче при разных спектрах излучения с помощью стандартного люксметра невозможно. Поскольку фотоприемники являются интегрирующим устройством и реагируют на полную мощность в области своей чувствительности, следует измерять количественное распределение квантов света с определенной энергией по частям спектра. Из-за того,

что многие светочувствительные материалы могут регистрировать излучение и за пределами видимой области спектра, необходимо использовать полосовые фильтры.

Исходя из особенностей полученного фотоотклика для фотоприемников, показанных на рис.5 весь видимый диапазон условно разделен на три части: 350÷480, 480÷600 и 600÷750нм. Количество полос и принцип их выбора предстоит еще обсудить. Распределение мощности излучения (в отн. ед.) в выделенных диапазонах для человеческого зрения при естественном (солнечном) освещении и искусственном освещении приведено в табл.1. Значения мощности, представленные в таблицы условны и отражают только соотношение между ними по выбранным диапазонам для разных источников и приемников. Курсивом отмечено восприятие человеческим глазом естественной освещённости при воздействии солнечного света. Рассмотренные диапазоны выбраны произвольно, их пределы и количество могут другими.

Таблица 1. Распределение мощности излучения по диапазонам

	<b>350÷480</b>	<b>480÷600</b>	<b>600÷750</b>	<b>источник</b>
Зрение человека	<i>0.5</i>	<i>1.1</i>	<i>0.3</i>	☀
	0.03	0.2	0.1	<i>ЛН</i>
	0.1	0.3	0.1	<i>ЛЛ</i>
	0.2	0.4	0.04	<i>СДЛ</i>
селен	0.3	0.6	0.03	☀
	0.3	0.1	0.1	<i>ЛН</i>
	0.1	0.2	0.1	<i>ЛЛ</i>
	0.1	0.2	0.01	<i>СДЛ</i>
кремний	2	0.1	14	☀
	0.01	0.1	0.6	<i>ЛН</i>
	0.04	0.2	0.1	<i>ЛЛ</i>
	0.1	0.3	0.1	<i>СДЛ</i>

Из приведенных результатов видно, что:

1. Лучшим материалом для фотоприемника люксметра является селен.
2. СДЛ источники в коротковолновой части излучают свет, близкий по составу к солнечному, но сильно искаженный в длинноволновой.
3. Лампы накаливания имеют распределение мощности, близкое к солнечному, но характеризуются чрезвычайно низким к.п.д.
4. Предложенное отдельное измерение освещенности по диапазонам с помощью стандартного люксметра и полосовых фильтров не позволяет существование узких полос, которые быть очень опасными для зрения.

Представляется важным при измерениях освещенности использовать методику разделения всего видимого диапазона на участки с помощью полосовых оптических фильтров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зак П. П. Потенциальная опасность освещения светодиодами для глаз детей и подростков / П. П.Зак, М. А. Островский // Светотехника. – 2012. – № 3. – С. 4-6.
2. **ГОСТ Р 55710-2013.** Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений. – Введ. 2014-07-01. – Москва, Стандартинформ, 2014. – 19 с.
3. **ГОСТ Р 54943-2012.** Здания и сооружения. Метод определения показателя дискомфорта при искусственном освещении помещений. – Введ. 2013-01-01. – Москва, Стандартинформ, 2013 – 27 с.

- ГОСТ Р 54944–2012. Здания и сооружения. Методы измерения освещенности. – Введ. 2013–01–01. – Москва : Стандартинформ, 2013 – 24 с.
- СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95. – Введ. 2017–05–08. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 135 с.
- ГОСТ 6825-91 (МЭК 81-84). Лампы люминесцентные трубчатые для общего освещения. – Введ. 1993–01–01. – Москва : Ком. стандартизации и метрологии СССР, 1992. – 242 с.
- Определение освещенности объектов современными светильниками / В. И. Тимченко [и др.] // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах. – Макеевка, МакНИИ, 2011. – 2, (26). – С. 96-104.

## FOTOMETRI LIGHT MODERN LIGHT SOURCES

*O.I. Moiseev, V.A. Soroka, V.I. Timchenko*

A comparative analysis of measurements of illumination produced by different sources of radiation, lamps based on: incandescent lamps (LN), fluorescent (LL) and led lamps (SDL), depending on the frequency of radiation, standard luxmeter

It is shown that the change in the nature of the emitters in modern lighting devices requires the evaluation of not only the integral illumination, but also the distribution of light intensity across the spectrum. It is proposed to use a standard luxmeter with a set of band-pass filters. To achieve this task, the color perception in light is defined as the product of the visibility function  $\Psi(\lambda)$  and  $w(\lambda)$  - the spectral intensity of the radiation. When measuring illumination, it is important to use the technique of dividing the entire visible range into sections using band-pass optical filters.

**Keywords:** light sources, color rendering, photodetector, photometry, light efficiency, light quality

*Поступила в редакцию 14.09.2018 г.*

### **Моисеев Олег Игоревич.**

студент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.  
E-mail: theatre.of.tragedy@mail.ru

### **Moiseev Oleg Igorevich**

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

### **Сорока Валентина Афанасьевна**

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и физического материаловедения ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», ДНР, г. Макеевка.  
E-mail: vasorokat1@mail.ru

### **Soroka Valentina Afanasyevna**

Candidate of Phisico-Mathematical Sciences, Docent, Associate Professor at Department of Physics and Physical Materials of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka.

### **Тимченко Владимир Иванович**

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.  
E-mail: vlitim@mail.ru

### **Vladimir Ivanovich Timchenko**

Candidate of Phisico-Mathematical Sciences, Docent, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

УДК 535.421

## ТЕХНОЛОГИЯ РЕАЛИЗАЦИИ АКУСТООПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

© 2018 И.А. Третьяков, Т.В. Белик

В настоящей работе предложена структура акустооптического устройства, где как базовый элемент выделяется акустооптическая ячейка, показано значение выбора материалов светозвукопровода и электроакустического преобразователя для обеспечения ее высокой эффективности. Приведен перечень перспективных материалов и эскизный технологический процесс создания акустооптической ячейки на их основе.

**Ключевые слова:** акустооптическая ячейка; светозвукопровод; электроакустический преобразователь, дифракция.

**Введение.** Акустооптические устройства управления лазерным лучом применяются как элементы адресации и прерывания информационного потока в оптических запоминающих устройствах, вычислительных средствах обработки радиосигналов, системах построения изображений и т.д. [1, 2]. Физические основы построения акустооптических устройств для оптической обработки информации изложены В. В. Клуздиным в [2]. Алгоритм расчета акустооптического устройства для ввода данных в оптоэлектронные системы представлен в [3].

**Постановка задачи.** Отечественная промышленность не выпускает акустооптических устройств из-за отсутствия соответствующих технологий. Возникает задача разработки акустооптических материалов, технологии их получения и создания на их основе светозвукопроводов, а также, соответственно, акустооптических ячеек, в лабораторных условиях, которые при соответствующей доработке могут быть внедрены в производство.

**Акустооптическая ячейка.** Независимо от функционального назначения любого акустооптического устройства его базовым элементом является акустооптическая ячейка, в составе которой можно выделить узлы электроакустического преобразователя, акустооптического (АО) взаимодействия и поглощения акустической энергии. Неотъемлемыми частями ячейки являются модули возбуждения электроакустического преобразователя (ЭАП) и обеспечения эксплуатационной стабильности. Эффективность преобразования акустооптическая ячейка (АОЯ) энергии управляющего радиосигнала в дифрагированную световую волну определяется соотношением вида:  $K_d = I_1 / I_0 = [\pi^2 P_0 L M_2 / (2\lambda^2 \cos^2 \theta H)]$ , где  $I_1, I_0$  - интенсивности дифрагированного и падающего на светозвукопровод лазерного излучения,  $\lambda$  - длина волны лазерного излучения,  $\theta$  - угол падения лазерного пучка на светозвукопровод,  $M_2 = (n^6 p_{mn}^2 / \rho V^3)$  - акустооптическая добротность светозвукопровода,  $P_0 = k P_{RS}$  - мощность акустической волны, распространяющейся в СЗП,  $L, H$  - длина и ширина электроакустического преобразователя,  $n$  - показатель преломления среды светозвукопровода,  $p_{mn}$  - фотоупругая постоянная в направлении распространения света в СЗП,  $\rho$  - плотность среды светозвукопровода,  $V$  - скорость распространения акустической волны в СЗП,  $k$  - коэффициент преобразования мощности радиосигнала  $P_{RS}$  в мощность акустической волны ( $k < 1$ ). Коэффициент является функцией  $k = f(k_{em}, k_1)$  где:  $k_{em}$  - коэффициент

электромеханической связи пьезоэлектрических пластин, применяемых в качестве ЭАП,  $k_1$  - коэффициент передачи связующих слоев, находящихся между ЭАП и торцом СЗП. Угол падения лазерного пучка на светозвукопровод (СЗП) определяется условием существования дифракции. Из приведенного выражения видно, что эффективность АОЯ определяется в основном  $M_2$  (характеристика светозвукопровода) и  $k$  (характеристика преобразователя и связующих слоев).

Кроме приведенных соображений в последнее время по мере роста опыта создания АОЯ стали представлять интерес материалы СЗП, в которых можно получить дифракцию с двойным лучепреломлением (анизотропную), так как в этом случае изменяется поляризация дифрагированного луча относительно поляризации падающего. Это позволяет значительно уменьшить уровень фоновой засветки линейки фотодетектора процессора обработки сигналов, что повышает их динамический диапазон [2]. До сих пор считалось, что реализовать такой режим возможно в СЗП на основе  $LiNbO_3$ . Однако конкуренцию этому кристаллу может составить  $GaP$ . Несмотря на то, что он оптически изотропен, как было показано специалистами фирмы TRW, при изотропной дифракции на сдвиговых акустических волнах направление поляризации дифрагированной световой волны может в нем изменяться на  $90^\circ$  относительно падающей. Вместе с тем, как было установлено авторами, самое сильное АО взаимодействие возникает в этих кристаллах для продольных акустических волн, в очень широком диапазоне их частот (до 8 ГГц), с малыми акустическими потерями.

Другими материалами СЗП, практическая значимость которых признается в настоящий момент, являются галогениды тяжелых металлов  $Hg_2Cl_2$ ,  $Hg_2Br_2$ ,  $Hg_2J_2$ ,  $Cs_2HgBr_4$ ,  $Cs_2HgCl_4$ ,  $Cs_2HgJ_4$  [1]. Помимо высоких акустооптических характеристик эти материалы не пьезоэлектрики, поэтому влияние электромагнитного излучения лазера на СЗП из них должно сводиться к минимуму.

Основываясь на приведенных соображениях, удалось синтезировать некоторые монокристаллы для создания СЗП и измерить их основные характеристики, необходимые для моделирования акустооптических устройств, а также изготовить экспериментальные акустооптические ячейки и измерить их эффективность. Данные исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики монокристаллов для создания СЗП

Материал СЗП	$\rho$ г/см <sup>3</sup>	Оптическая волна		Акустическая волна				$M_2$ , $\times 10^{18}$ $c^3 / z$	$K_d$ , $\times 10^{-3}$ %/мВт		
		$n$	$\vec{E}$	$\vec{N}$	$\vec{N}$	$V$ $\times 10^5$ см/с	$\alpha$ , дБ/μс				
$GaP$	4,13	3,31	$\perp$	[110]	[110]	6,32	0,07	44,5	54,7		
$Hg_2Cl_2$	4,13	$n_a=1,94$	[001]		[110]	4,13	0,006	22,2	29,4		
		$n_b=1,93$			[100]	0,35				1,8	678
		$n_c=2,62$			[110]						
$Cs_2HgCl_4$	4,13	$n_a=1,67$	[010]	[001]	[001]	1,91	0,8	30	38		
		$n_b=1,65$	[100]	[001]	[001]	1,91	1,0	25			
		$n_c=1,65$	[100]	[010]	[010]	1,94	1,0	21			
$Cs_2HgBr_4$	4,13	$n_a=1,67$	[100]	[010]	[010]	1,75	0,67	46	52		
		$n_b=1,65$	[010]	[001]	[001]	1,77	0,67	33			
		$n_c=1,65$	[001]	[010]	[010]	1,75	0,8	25			

Векторами  $\vec{E}$ ,  $\vec{N}$ ,  $\vec{N}$  обозначены, соответственно, направления электрического поля лазерного излучения, перемещения и скорости акустической волны,  $\alpha$  - затухание акустической волны,  $\rho$  - плотность материала СЗП. Измерения проводились на частоте акустической волны 250 МГц и длине волны лазера 0,63 мкм. У всех экспериментальных АОЯ размер внешнего электрода  $1 \times 1 \text{ мм}^2$  (единичный), что позволяет адекватно оценить их эффективность  $K_d$ .

Традиционными материалами для создания пьезоэлектрических электроакустических преобразователей в виде пластинчатых (на сдвиговую и продольную акустические волны), является  $\text{LiNbO}_3$  (на частоты до 400 МГц). На более высоких частотах (до 18 ГГц) - текстурированные пьезополупроводниковые пленки  $\text{ZnO}$  соответствующих ориентаций в силу хорошо отработанной технологии создания для них связующих слоев и высокого коэффициента электромеханической связи [1, 2].

**Технологический процесс.** Эскизный технологический процесс создания АОЯ включает получение монокристаллов, изготовления светозвукопроводов, изготовление и крепление электроакустического преобразователя. Технологическое оборудование для роста приведенных монокристаллов, а также подготовительные операции по дополнительной очистке исходных компонентов их, с незначительными доработками, соответствуют описанному в [4].

Рост  $\text{GaP}$  осуществлялся из газовой фазы, были получены монокристаллы диаметром 12 мм, длиной 18 мм. Из них по технологии обработки твердых кристаллов [4] создавались (ориентировались согласно таблице по необходимым кристаллографическим направлениям, вырезались, шлифовались и полировались) образцы СЗП размером  $6 \times 12 \text{ мм}$ . На них напылялась поликристаллическая пленка  $\text{ZnO}$  с ориентацией кристаллитов, необходимой для возбуждения сдвиговых или продольных акустических волн [2]. Наносилась пленка на установке магнетронного напыления типа «Катод-1» по технологическим режимам, приведенным в [6], путем распыления ионов и мишени из чистого  $\text{Zn}$  в атмосфере  $\text{O}_2$ . Скорость напыления  $(2...5) \times 10^2 \text{ мкм/мин}$ . Качество пленки и ориентация кристаллитов оценивалась рентгеноструктурным анализом на установке ДРОН-3. Как оказалось, качество пленки сильно влияет на характеристики АОЯ. В частности, существует определенное влияние температуры осаждения пленки, а также местоположения и ориентации подложки в процессе осаждения. Electroды ЭАП изготавливались методом фотолитографии. Изготовленные АОЯ с единичным электродом имели ширину полосы пропускания по уровню - 3 дБ, равную 1,1 ГГц, на центральной частоте - 2,6 ГГц.

В силу определенных физико-технологических трудностей удалось получить только монокристаллы  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$  методом направленной сублимации из газовой фазы хлорида ртути в диапазоне температур  $300...480 \text{ }^\circ\text{C}$  в вакуумированном контейнере. Для выращивания использовалась двухкамерная вертикальная электропечь. Сублимирующий материал располагался в нижней части контейнера, который поднимался вверх со скоростью  $0,015...0,058 \text{ см/ч}$ . Были получены кристаллы диаметром до 8 мм и длиной  $12...16 \text{ мм}$ , ориентированные в направлении [110] и [001]. Методами технологии обработки мягких водорастворимых кристаллов [5] были созданы светозвукопроводы размером  $5 \times 8 \text{ мм}^2$ . Из-за большого показателя преломления на гранях заготовки, проводящих свет, было нанесено просветляющее покрытие методом, описанным в [7]. Наибольшие трудности из-за химической активности материала СЗП

вызвал процесс крепления ЭАП, в связи с чем, была создана технология осаждения органических пленок, которые использовались в качестве бездефектных промежуточных слоев. Затем методом вакуумной компрессии крепился ЭАП из пластины  $LiNbO_3$  X-среза. Далее поверхности ЭАП и СЗП под давлением взаимно соприкасались, а пластина преобразователя доводилась до необходимой толщины (порядка 30...40 мкм), и на ее поверхность методом фотолитографии наносились электроды.

Монокристаллы  $Cs_2HgCl_4$  и  $Cs_2HgBr_4$  получены в вертикальной двухзонной печи по методу Бриджмена-Стокбаргера [8], технология изготовления СЗП и АОЯ на их основе практически аналогична выше приведенной для  $Hg_2Cl_2$  (некоторое отличие только технологических режимов при сохранении технологического процесса).

**Выводы.** В данной работе предложена структура акустооптического устройства, с акустооптической ячейкой в роли базового элемента. Предложены перспективные акустооптические материалы для светозвукопровода и электроакустического преобразователя, обеспечивающие высокую эффективность и эскизный технологический процесс создания акустооптической ячейки на их основе.

Приведенные акустооптические материалы, технология их получения и создания на их основе светозвукопроводов, а также, соответственно, акустооптических ячеек, показывает существование лабораторных технологий, которые при соответствующей доработке могут быть внедрены в производство.

Рекомендуемые авторами монокристаллы для светозвукопровода и изготовленные акустооптические ячейки использовались в Донецком НИИ комплексной автоматизации при создании процессоров обработки радиосигналов, а также управления лазерным пучком в оптических запоминающих устройствах, для записи информации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптическая обработка информации // Радиоэлектроника (состояние и тенденции развития). Обзор по материалам иностранной печати. – Москва, 1992. – № 3. – С. 57-88.
2. Клюдзин В. В. Физические основы построения акустооптических устройств : учеб. пособие / В. В. Клюдзин. – Ленинград : Ленингр. ин-т авиац. приборостроения, 1980. – 74 с.
3. Третьяков И. А. Алгоритм расчета акустооптического устройства по виду электрооптической кривой / И. А. Третьяков, Т. В. Белик // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г : Технические науки. – 2017. – № 2. – С. 9-19.
4. Вильке К. Е. Выращивание кристаллов / К. Е. Вильке. – Ленинград : Недра, 1977. – 600 с.
5. Бонд В. Л. Технология кристаллов / В. Л. Бонд ; пер. с англ. Н. П. Ростовикова, Л. Н. Демьянец, В. С. Балицкого ; под ред. В. С. Балицкого. – Москва : Недра, 1980. – 304 с.
6. Шермергор Г. Д. Пленочные пьезоэлектрики / Г. Д. Шермергор, Н. И. Стрельцова. – Москва : Радио и связь, 1986. – 136 с.
7. Справочник технолога-оптика / [И. Я. Бубис и др.] ; под общ. ред. С. М. Кузнецова, М. А. Окатова. – Ленинград : Машиностроение, 1983. – 414 с. : ил.
8. Данилов В. В. Некоторые физико-химические свойства монокристаллов системы  $A^I B^{II} C^{VII}$  / В. В. Данилов, А. В. Богданова, В. Г. Шульга // Физическая электроника : респ. межвед. науч.-техн. сб. – Львов, 1981. – № 23. – С. 64-68.

Поступила в редакцию 20.09.2018 г.



THE TECHNOLOGY OF IMPLEMENTATION OF ACOUSTO-OPTIC DEVICES

*I.Tretiakov, T.Belik*

In this paper, the structure of the acousto-optic device is proposed, where the acousto-optic cell is allocated as a basic element, the value of the choice of materials of the light and acoustic transducer to ensure its high efficiency is shown. The list of perspective materials and preliminary technological process of creation of acousto-optic cell on their basis is given.

Key words: acousto-optic cell; light-sound pipeline; electroacoustic transducer, diffraction.

**Третьяков Игорь Александрович**

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

**Tretiakov Igor**

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

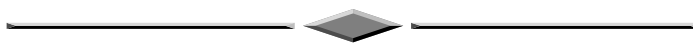
**Белик Татьяна Владимировна**

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

**Belik Tatyana**

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

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ



УДК 621.39

### ОСОБЕННОСТИ ВНЕДРЕНИЯ SDN-РЕШЕНИЙ В СЕТЬ ОПЕРАТОРА МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

© 2018 *В.Н. Лозинская, И.П. Долгих*

---

В работе проведен анализ перспектив и проблем внедрения SDN-решений в сетях операторов мобильной связи. В качестве основных критериев эффективности использования концепции SDN используются экономические показатели.

**Ключевые слова:** SDN-решение; оператор мобильной связи; LTE; MPLS; OpenFlow-контроллер; SDN-коммутатор; капитальные и операционные затраты оператора.

---

**Введение.** В современном мире создаются новые услуги, возможности и технологии, соответствующие высоким требованиям, установленным спросом потребителей. Одним из наиболее технологичных и наиболее быстро развивающихся остаются мобильные сети. При том, что услуги, которые совсем недавно были доступны только через проводное подключение к сети, с развитием вычислительных возможностей мобильных средств связи и массовым применением последних операторами в рамках стандартов 3-го и 4-го поколений стали теперь мобильными и могут использоваться где угодно и когда угодно [1]. С точки зрения пользователя наличие такого широкого спектра возможностей очень привлекательно, но обязательно приводит к существенному увеличению трафика мобильного оператора. Последнее обстоятельство значительно влияет на расходы мобильного оператора, а значит и на стоимость предоставляемых им услуг. Исходя из этого, мобильным операторам связи необходимо принимать во внимание новые подходы к построению и модернизации сетей. Одним из таких решений, позволяющим это сделать является SDN (Software Defined Networking) [2].

**Постановка проблемы.** Комплексный подход к построению или модернизации существующих сетей становится основной тенденцией и привлекает внимание компаний-поставщиков услуг. Это позволит последним наиболее выгодно решить появляющиеся проблемы. Например, лавинообразный рост трафика передачи данных. В этом случае оператору связи приходится изменять тарифы, в связи с увеличением затрат. Это, в свою очередь, негативно сказывается на потребителе, поскольку стабильность цены на услуги является одним из основных аспектов выбора того или иного оператора связи. Суммируя вышесказанное, цель статьи состоит в улучшении показателей экономической эффективности работы сети оператора мобильной связи за счет внедрения и эффективного использования SDN-решений.

**Основная часть.** Для получения верных показателей экономической эффективности рассмотрим основные типы затрат при внедрении SDN-решений в мобильную сеть. Следует отметить, что спецификой мобильной сети является то, что абоненты получают доступ к сети через мобильные устройства – телефоны, смартфоны или планшеты. Т.е, сеть оператора состоит из двух частей: беспроводного сегмента, который осуществляет функцию подключения абонентов по радиointерфейсу к сети, и транспортной сети, которая осуществляет функции транспортировки сигнала к пункту

назначения. Что касается первой части, то здесь существуют разнообразные стандарты второго, третьего и четвертого поколений, в которых существуют отличия в основных элементах, по-разному используют частотный диапазон и предлагают разные скорости для разнообразных услуг. Транспортная сеть, чаще всего состоит из коммутаторов и маршрутизаторов разного уровня. Для определенности будем считать, что у оператора уже есть сеть LTE (Long-Term Evolution) или, он собирается модернизировать существующую сеть таким образом, чтобы учесть возможные риски. Например, при построении сети LTE очень большие средства тратятся на такие элементы как PGW (Public Data Network Serving Gateway), SGW (Serving Gateway) и MME (Mobility Management Entity) [3]. Но их количество, по сравнению с маршрутизаторами транспортной сети, достаточно мало, поэтому оператор сегодня тратит средства на них относительно редко и лишь в случае необходимой замены. Для транспортной сети ситуация иная. Несмотря даже на то, что каждые 5-7 лет они требуют плановой замены, сеть будет постоянно требовать масштабирования, замены портов на более скоростные: если есть возможность – путем замены секций на маршрутизаторе, если нет – заменой устройства. Именно на транспортную сеть попадает наибольшая часть, как операционных, так и капитальных затрат.

Основной идеей SDN является лишение каждого маршрутизатора возможности самостоятельно принимать решения, и передача этих полномочий контроллеру. На контроллере установлено приложение (программа) которое, исходя из поставленных операторами заданий, выражает требования к политике и правилам передачи (рис. 1).

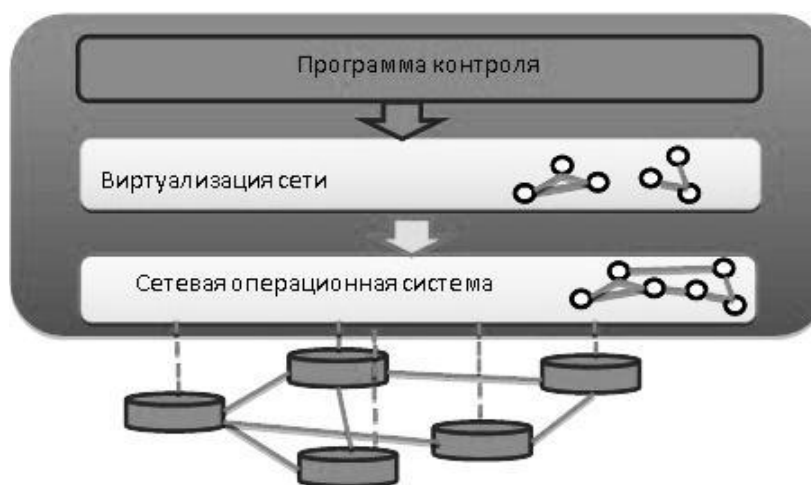


Рис. 1. Иерархическая структура SDN-сети

На уровне виртуализации [4], где в соответствии с выдвинутыми требованиями, контроллер создает логические топологии и представляет группе физических устройств в виде одного или нескольких виртуальных. Операционная система сети переводит эти требования в язык, понятный для коммутаторов. Через специальный интерфейс связи, используя соответствующий протокол, (сейчас самым распространенным является OpenFlow [5]), контроллер записывает необходимые данные в таблицу физического коммутатора. Таким образом, у коммутаторов остается ограниченный функционал, и они не принимают решения самостоятельно, а только осуществляют передачу пакетов на основе команд, приходящих извне. Итак, всю сеть можно представить в качестве двух плоскостей – данных и контроля. Для плоскости данных существует

общеизвестная абстракция – распределение на уровне. Для площади контроля такой абстракцией является концепция SDN.

Реализация контроллера – первый вопрос, возникающий при построении SDN сети. Контроллер представляет собой сервер, на котором установлено соответствующее программное обеспечение. Отношения между ним и коммутаторами с поддержкой OpenFlow очень схожи на отношения типа «клиент-сервер», где сервер (контроллер) выносит решения, а клиент (коммутатор) должен воплощать эти решения в жизнь. Задачей проектировщика является не только определения количества контроллеров, но и их месторасположения. В общем случае сеть будет иметь вид звезды – один контроллер, подключенный ко всем элементам сети. Тем не менее, есть возможность, в зависимости от количества узлов и их размещения, использовать несколько контроллеров, которые будут создавать несколько SDN доменов.

Для того, чтобы определить месторасположения контроллеров, предлагается следующая методика, учитывающая оценки задержек ответов контроллера на запросы элементов сети. Методика состоит в следующем. Допустим, что есть граф  $G(V, E)$ , где  $V$  – количество узлов,  $E$  – количество соединений. Обозначим через  $d(r, s)$  – кратчайший маршрут от узла  $r \in V$  к  $s \in V$ , тогда имеем:

$$L_{cp}(R) = \frac{1}{V} \sum_{r \in V} \min_{s \in V} d(r, s), \quad (1)$$

где  $L_{cp}(R)$  – оценка средней задержки при размещении контроллера в  $r \in V$ .

Сравнив таким образом оценки средних задержек для каждого возможного  $r$ , находим оптимальное расположение контроллера [4]. Если полученное оптимальное значение оценки средней задержки не удовлетворяет, или из-за большого количества элементов сети операционных возможностей сервера не хватает, логично использовать несколько контроллеров, разбив перед этим сеть  $G(V, E)$ , на несколько  $(G_1(V_1, E_1), \dots, G_n(V_n, E_n))$  по принципу топологической близости узлов. Для каждой из полученных сетей необходимо использовать предложенную методику. Логично, что для этого случая контроллеры должны быть связаны друг с другом. Это достигается путем установления специального приложения [6], для которого взаимодействие контроллер-контроллер превращается во взаимодействие контроллер-коммутатор. Для этих целей можно использовать FlowVisor [7, 8] – специальный OpenFlow контроллер, который выступает в качестве прозрачного прокси между OpenFlow коммутаторами и несколькими OpenFlow контроллерами.

Транспортные сети большинства операторов мобильной связи сегодня реализованы на основе технологии MPLS. Для того, чтобы переход на новое решение не был столь резким, предлагаются следующий алгоритм, состоящий из трех этапов: замена пограничных маршрутизаторов; постепенная смена оставшихся маршрутизаторов; виртуализация сети. Очевидно, что замену пограничных маршрутизаторов необходимо проводить последовательно, чтобы работа сети не останавливалась. Т.е., необходимо отсоединить один из маршрутизаторов и заменить его на OpenFlow-коммутатор, подключенный к контроллеру, где уже есть смонтированный механизм функционирования MPLS. Также можно поставить OpenFlow-коммутатор в параллель с пограничным маршрутизатором и переключать соединение постепенно (рис. 2). Для сети все выглядит так, как будто никаких изменений не происходило, потому что контроллер просто берет на себя те же самые функции контроля, которые были до этого у маршрутизатора. Как только все

пограничные маршрутизаторы будут заменены – получим сеть, выполняющую основные функции сети SDN: контроллер определяет маршрут следования трафика и добавляет метки всех необходимых LSP сети. Но эта сеть не полностью SDN, потому что она реагирует на процессы, которые в ней происходят не динамически – контроллер получает оперативную информацию только о тех соединениях, которые подключены непосредственно к SDN коммутатору.

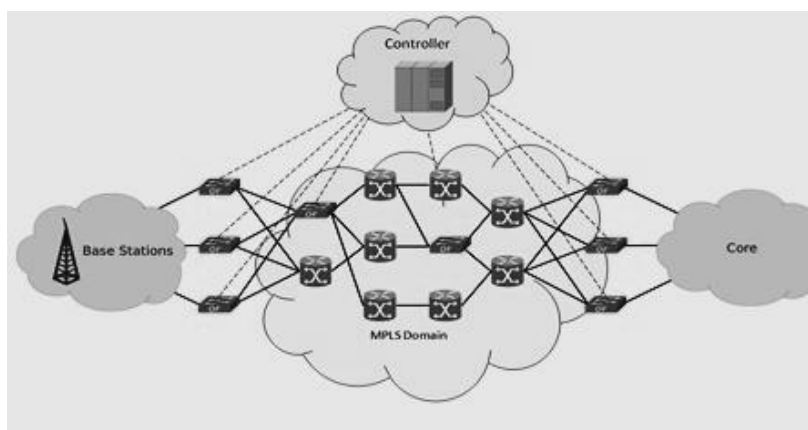


Рис. 2. Замена ключевых транзитных маршрутизаторов

Очевидно, что для полного перехода к SDN-решению необходимо, чтобы все элементы поддерживали OpenFlow, с условием подключения к контроллеру.

Для осуществления вышеперечисленного процесса перехода рассмотрим следующее: пусть каждый маршрут в сети проходит хотя бы через один транзитный SDN-коммутатор. При условии, что пограничный SDN-коммутатор прокладывает маршрут через всю сеть к другому пограничному коммутатору, то теперь маршрут нужно проложить только до ключевого SDN-коммутатора. Обозначим  $l_{ij}$  – переменную, которая принимает значение 1, если в сети существует соединение между узлами  $i$  и  $j$ , а  $x_{ij}^{st}$  – переменную, которая равна 1, если соединение между  $i$  и  $j$  лежит на маршруте  $p_n(s,t)$ , где  $s$  и  $t$  – соответствующие пограничные маршрутизаторы. Переменная  $y_i$  принимает значение 1, если маршрутизатор  $i$  должен быть заменен,  $u_i^{st} = 1$ , если маршрут проходит через SDN-коммутатор.  $V$ -множество, в состав которого входят маршрутизаторы облака. Математическая модель нахождения ключевых узлов состоит из уравнений (2-8):

$$x_{ij}^{st} \leq l_{ij}, \forall i, j \in V, \quad (2)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & l_{ij} > 0 \\ 0, & l_{ij} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\sum_i u_i^{st} = 1, \quad (4)$$

$$u_i^{st} \leq y_i, \forall i \in V, \quad (5)$$

$$c = \sum_i d, \quad d = \begin{cases} 1, & a_{0j} > 0 \\ 0, & a_{0j} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$m = \sum c; l = n; k_{ml} = \begin{cases} 1, & x_{ij}^{st} = 1 \\ 0, & x_{ij}^{st} = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

$$\min_{x_{ij}^{st}, u_i^{st}} \sum R. \quad (8)$$

Выражение (2) означает, что используются только существующие маршруты. Выражение (3) – заполняется квадратная матрица  $a[n][n]$ . Уравнение (4) ставит требование к тому, что каждый маршрут от одного пограничного ( $s$ ) к другому ( $t$ ) маршрутизатору должен содержать хотя бы один SDN-коммутатор. Уравнение (5) указывает на то, что элемент сети  $i$  выбран для замены. Выражение (6) подсчитывает количество непосредственных соединений  $d$  с маршрутизатором  $s$ . Таким образом, рассчитывается  $m$  – общее количество всех возможных маршрутов от  $s$  до  $t$ . Далее, по (7) формируется матрица  $k$ , с количеством строк, равным количеству маршрутов, и количеством столбцов, равным количеству элементов сети. Формула (8) указывает на необходимость минимизировать количество маршрутизаторов, которым нужна замена, с условием (5). Следующим этапом является постепенная смена оставшихся маршрутизаторов на SDN – коммутаторы, пока SDN сеть не становится полноценной.

Как только внедрены SDN-решения стоит оценить экономическую эффективность этого процесса. Рассмотрим капитальные и операционные затраты оператора, исходя из того, что оценке подвергается только транспортная сеть. Пусть  $P_s$  – цена одного SDN-коммутатора,  $N_s$  – общее количество маршрутизаторов сети, в которую вносятся изменения.  $P_k$  – цена контроллера. Исходя из этого, сразу можно оценить общую сумму капитальных затрат для перехода сети на SDN:

$$S_{SDN} = N_s \cdot P_s + 2 \cdot k \cdot P_k, \quad (9)$$

где  $k$  – количество контроллеров, а коэффициент 2 указывает на наличие резервирования.

Пусть полный переход сети на SDN занимает время  $t(B)$  – функция от  $B$  – бюджета на капитальные затраты за год. Определим цену на обычный маршрутизатор как  $P_{0s}$ . Максимальная пропускная способность сети в таком случае

$$\Delta C = \sum_i e_i \cdot (N_1 \cdot k_1 + \dots + N_n \cdot k_n), \quad (10)$$

где  $i$  – количество пограничных маршрутизаторов сети,  $N_j$  – количество портов  $i$ -го маршрутизатора,  $k_j$  – скорость соответствующей группы портов  $i$ -го маршрутизатора. Допустим также, что оператору известно значение объема трафика за год  $TR$  [Гбит/год], и он прогнозирует ежегодное увеличение на  $\Delta tr\%$ . Для приведения трафика и пропускной способности к одинаковым единицам, умножим  $\Delta C$  на коэффициент  $G = 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 31.536 \cdot 10^6$  и получим  $\Delta C \cdot G$  [Гбит/год]. Первое необходимое, но недостаточное условие, вытекающее из этого:

$$\Delta C \cdot G > TR. \quad (11)$$

Исходя из того, что по всей сети должны быть выдержаны необходимые параметры QoS, установим максимально допустимое соотношение между объемом трафика и пропускной способностью, для удовлетворения этих параметров:

$$\frac{TR}{\Delta C \cdot G} < H. \quad (12)$$

Необходимо определить затраты операторы за время  $t(B)$  в двух случаях: если SDN-решение внедрялось, и если сеть развивалась без SDN. Без SDN, часть от общего количества маршрутизаторов  $N_s$ , каждый год будет требовать внеплановой замены. Допустим, что эта часть составляет не более 14% в год. Также, увеличение трафика в частях сетей, которые отвечают за густонаселенные, городские районы, значительно быстрее, чем в сельской местности. Приняв во внимание изменение соотношения между количеством сельского и местного населения ( $Y\%$ ), количеством пограничных маршрутизаторов ( $E$ ), к которым идут пакеты с базовых станций, получаем следующие соотношения.

$$\Delta tr_{MC} = \Delta tr + 0.3; \quad (13)$$

$TR_1 = TR \cdot Y$  увеличивается ежегодно на  $\Delta tr_{MC}$ ;

$$H > \frac{TR_1}{E \cdot G \cdot \Delta c}, \quad (14)$$

где  $\Delta c$  – пропускная способность старого маршрутизатора.

Обозначим цену более продуктивного маршрутизатора как  $P_{нов} = 1.6 \cdot P_{стар}$ . Его пропускная способность  $C_{нов} = \Delta c + C_{cp}$ , где  $C_{cp}$  – разница между пропускными способностями более мощного и старого маршрутизаторов. Исходя из этого, максимальное увеличение пропускной способности части сети, которая подключена к базовым станциям,  $C_{cp} \cdot E$ . Увеличение пропускной способности сети, когда просто замена не будет давать требуемого увеличения пропускной способности, будет проводится путем дополнения пограничных маршрутизаторов и соответствующего расширения облака. При этом каждый такой маршрутизатор будет увеличивать пропускную способность сети на  $C_{нов}$ . Теперь, если условие (14) не выполняется, необходимо заменить соответствующие пограничные маршрутизаторы, потратив  $S = P_{нов} \cdot E$ , что увеличит пропускную сети на  $C_{cp} \cdot E$ . Если условие (14) все еще не выполняется, а трафик снова возрастает и замена уже сделана, сеть расширяется на  $C_{нов} \cdot N$ , где  $N$  – количество дополнительных пограничных маршрутизаторов.

Оценочная стоимость таких изменений будет теперь составлять  $S(t) = P_{нов} \cdot E + \left( P_{нов} \cdot N + P_{стар} \cdot \frac{1}{4} k \right)$ , где  $k$  – максимальное количество узлов, через

которые проходит пакет от одного пограничного маршрутизатора к другому. Одновременно проверяется и условие (12), которое учитывает уже сеть в целом, и аналогично внедряются изменения в сеть. Таким образом, за время  $T$  при развитии сети без SDN имеем капитальные затраты  $S(t)_{конечное} + 0.14 \cdot N_s \cdot T$ . Что касается развития от SDN, за время  $T$  изменения до начальной сети дали нам затраты  $S_{SDN}$ , к которым следует добавить, в зависимости от выполнения условий (12) и (14) соответственно  $S(t) = \left( P_s \cdot N + P_s \cdot \frac{1}{4} k \right)$ .

Для оценки работоспособности предложенной методики разработан программный пакет, который ее реализует. С его помощью произведена оценка динамики затрат на развитие классическим путем и на основе SDN-решений (рис. 3).

Исходя из результатов моделирования оператор получит прибыль через 2.5 года после полного внедрения SDN-решений. Через 5 лет разница между затратами с и без SDN составит 26% и будет увеличиваться.



Рис. 3. Сравнение затрат оператора на SDN-решение и на традиционную сеть

**Выводы.** Предложены решения по внедрению SDN-решений в сеть оператора мобильной связи. Централизованный контроль над сетью, при таком внедрении, улучшает и ускоряет контроль над ней: внесение изменений в любые ее параметры будет занимать незначительное время, по сравнению с традиционной сетью. Предложены рекомендации по выбору параметров SDN-контроллера и алгоритм постепенной виртуализации уровня управления транспортной MPLS сетью. По разработанной методике проведено моделирование, которое показало, что оператор получит прибыль после полного внедрения SDN-решений, а разница между затратами для сетей с SDN-решениями и без них будет увеличиваться.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов В. И. Сети и стандарты мобильной связи : учеб. пособие / В. И. Данилов. – Санкт-Петербург : СПбГУТ, 2015. – 100 с.
2. Feamster N. The Road to SDN: An Intellectual History of Programmable Networks [Электронный ресурс] / N. Feamster, J. Rexford, E. Zegura. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : <https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall13/cos597E/papers/sdnhistory.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения 05.10.2017.
3. Гельгор А. Л. Технология LTE мобильной передачи данных : учеб. пособие / А. Л. Гельгор, Е. А. Попов. – Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 204 с.
4. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013–2018 [Электронный ресурс]. – 2014. – February 5. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : <https://www.acens.com/blog/wp-content/images/cisco-global-mobile-data-2013%E2%80%932018-blog-acens.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения : 05.10.2017.
5. OpenVirteX – A Network Hypervisor [Электронный ресурс] / Ali Al-Shabibi [et al.] // Open Networking Lab. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : <http://ovx.onlab.us/wp-content/uploads/2014/04/ovx-ons14.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения : 05.10.2017.



6. Heller B. The Controller Placement Problem [Электронный ресурс] / B. Heller, R. Sherwood, N. McKeown. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : <http://yuba.stanford.edu/~nickm/papers/hot21-heller.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения : 05.10.2017.
7. OpenFlow Switch Specification. Version 1.3.0 (Wire Protocol 0x04), June 25, 2012 [Электронный ресурс] // Open Networking Foundation. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : <http://www.cs.yale.edu/homes/yu-minlan/teach/csci599-fall12/papers/openflow-spec-v1.3.0.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения : 05.10.2017.
8. Phemius K. DISCO: Distributed Multi-domain SDN Controllers [Электронный ресурс] : (Submitted on 28 Aug 2013 ([v1](#)), last revised 29 Aug 2013 (this version, v2)) / K. Phemius, M. Bouet, J. Leguay. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00854899v2/document>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения : 05.10.2017.

*Поступила в редакцию 03.09.2018 г.*

## SDN-SOLUTIONS IMPLEMENTATION FEATURES IN MOBILE OPERATOR'S NETWORK

*V.N.Loizinskaya, I.P.Dolgh*

Analysis of SDN-solutions possibility and inculcation problems in mobile operator's networks is made. Economic indexes are used as basic criterions of effective using SDN-solution.

**KeyWords:** SDN-solution; mobile operator; LTE; MPLS; OpenFlow-controller; SDN-switch; operator's capital and operating costs.

**Лозинская Виктория Николаевна**, кандидат технических наук; ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», доцент кафедры автоматизации и телекоммуникаций, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58.  
E-mail: [lvn\\_04@mail.ru](mailto:lvn_04@mail.ru)

**Loizinskaya Vicktoriya Nickolaevna**, candidate of engineering science; Donetsk National Technical University; assistant professor at the Department of automatics and telecommunication.

**Долгих Ирина Петровна**; ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», старший преподаватель кафедры автоматизации и телекоммуникаций, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58.  
E-mail: [lvn\\_04@mail.ru](mailto:lvn_04@mail.ru)

**Dolgh Irina Petrovna**, Donetsk National Technical University; senior lecturer at the Department of automatics and telecommunication.

УДК 537.86.029

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПОДАВИТЕЛЬ МИКРОФОНОВ РАДИОЗАКЛАДНЫХ УСТРОЙСТВ И ДИКТОФОНОВ

© 2018 *М.В. Бабичева, А.С. Попов, А.В. Яновский*

В работе проведено моделирование процесса и экспериментальное исследование влияния модулированного ультразвука на нелинейные элементы ЕМС и МЭМС микрофонов мобильных телефонов, в режиме диктофона и радиозакладок диапазона 433 МГц.

**Ключевые слова:** ультразвуковой генератор, генератор на триггере Шмидта, ЕМС и МЭМС микрофоны, подавление микрофонов ультразвуком.

**Введение.** Применение активной акустической маскировки позволяет снизить отношение сигнал/шум на входе технического средства разведки за счет увеличения уровня помехи. Для этой цели используются генераторы акустического шума, но они имеют недостатки: шум в акустическом диапазоне хорошо слышен поэтому необходимо чтобы его уровень соответствовал санитарным нормам, факт включения генератора очевиден.

Эти недостатки можно устранить, используя шум в ультразвуковом диапазоне, однако, маскировать нужно сигнал в звуковом диапазоне, а не в ультразвуковом. При попадании ультразвука в тракт усилителя микрофона на выходе появляется разностная частота, которая при определенных условиях попадает в акустический диапазон. При этом звука мы не услышим, но на вход принимающего или записывающего устройства попадет только шум. Такие методы особенно эффективны для подавления речевого сигнала, записываемого на диктофон, поскольку обычными методами создания радиопомехи этого сделать невозможно. В настоящее время в основном используются диктофоны мобильных телефонов. Представленные на рынке промышленные образцы ультразвуковых подавителей микрофонов характеризуются высокой мощностью излучения и довольно большими габаритами [1].

Целью данной работы является создание компьютерной модели и лабораторного макета ультразвукового подавителя радиозакладок и диктофонов, исследование возможности закрытия аудиосигнала, поступающего на микрофон.

**Генератор ультразвуковой частоты на триггерах Шмидта.** Для получения ультразвука частотой 25-30 кГц был использован генератор на двух триггерах Шмидта. Двухвходовый триггер Шмита позволяет реализовать управляемый генератор [2]. Для расчета компонентов схемы было проведено моделирование устройства в среде MicroCap. На рисунке 1 представлена принципиальная схема генератора и выходная частота 28кГц, снятая в точке а. Затем был добавлен еще один триггер Шмидта с другими значениями емкости и сопротивления для получения модулирующей частоты 250 Гц. В процессе моделирования выяснилось, что номинал резистора R3 очень влияет на процесс модуляции, при больших значениях R3 модуляции не происходило вообще, при меньших значениях, модуляция происходила, но сильно искажала сигнал. На рисунке 2 представлена схема с оптимальным подбором компонентов. На том же рисунке- форма выходного сигнала, и характерный для частотной модуляции спектр, с гармониками малой амплитуды. который совместно с усилителем с индуктивной нагрузкой, необходимой Для получения достаточного размаха амплитуды на излучателе, к схеме был добавлен усилитель на полевом транзисторе, который вместе с

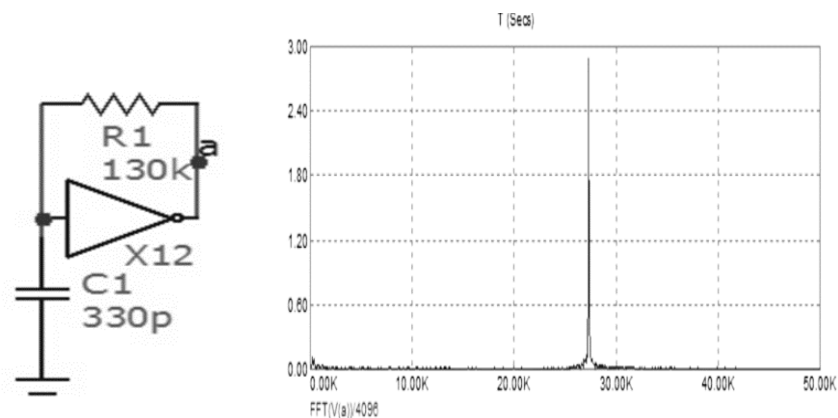


Рис. 1. Триггер Шмидта и генерируемая им частота в ультразвуковом диапазоне

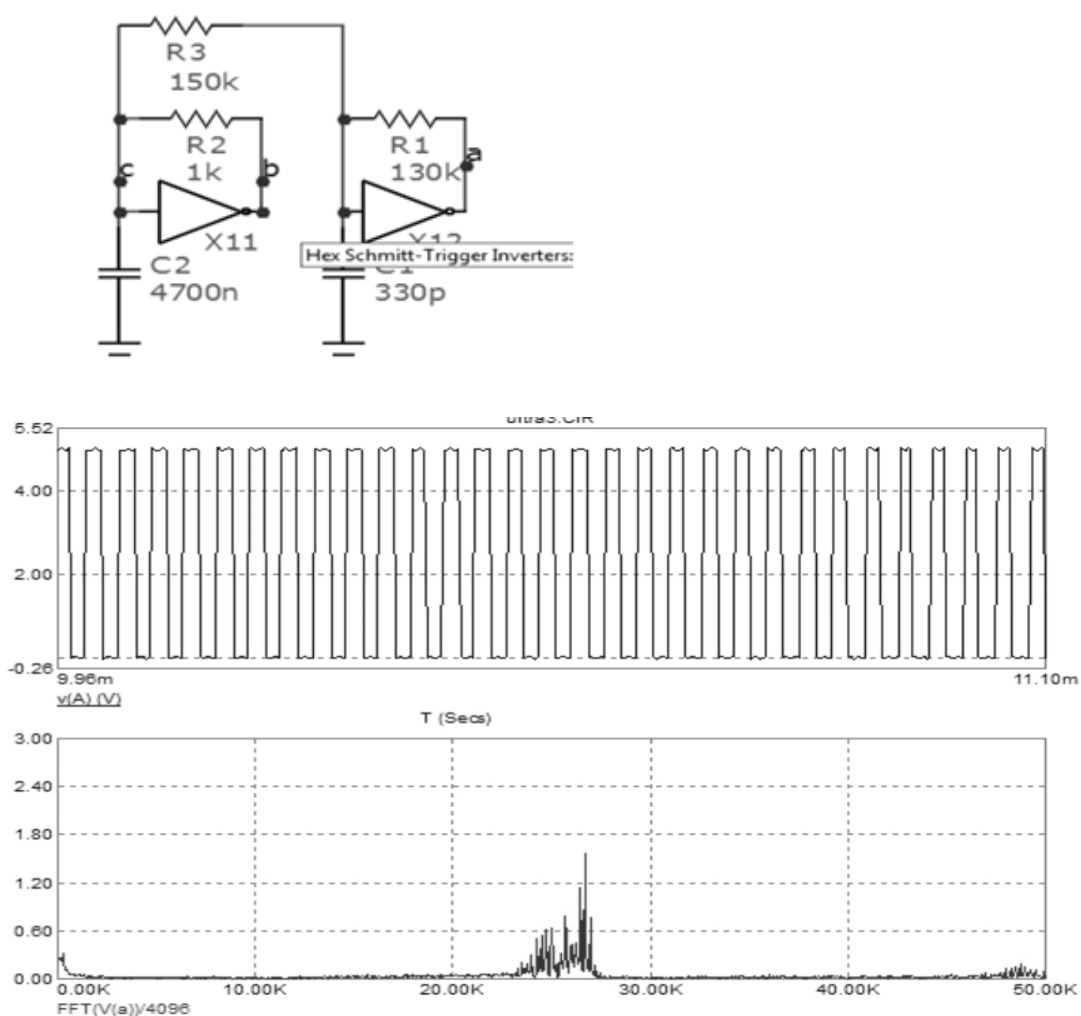


Рис. 2. Соединение двух триггеров Шмидта, временная диаграмма и спектр выходного сигнала

индуктивностью и конденсатором, представляют из себя «обратноходовой преобразователь» [2]. Напряжение на выходе такого преобразователя не может оказаться больше чем напряжение питания. Конденсаторы C3 и C4, совместно с

индуктивностью немного сглаживают импульсы, придавая им синусоидальный вид. В качестве имитации нелинейности микрофона, поскольку в идеальной среде MicroCap невозможно представить реальный микрофон, были использованы 4 диода, элемента с нелинейной вольтамперной характеристикой (рис. 3).

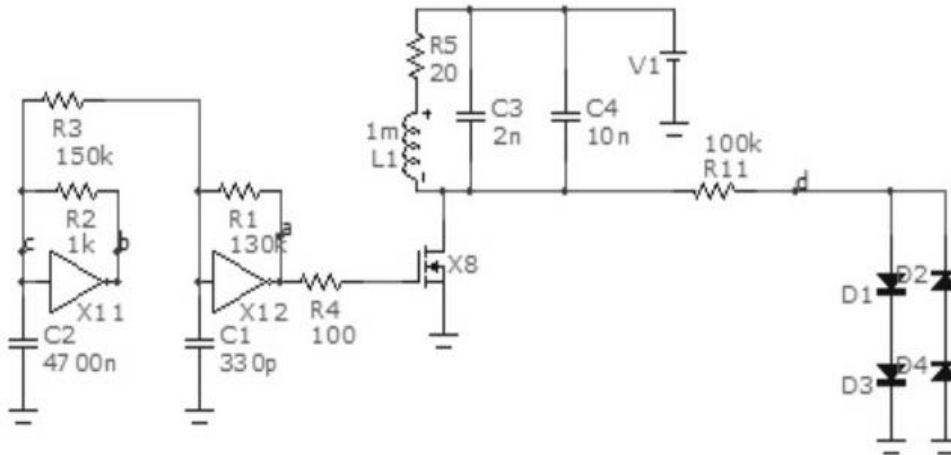


Рис. 3. Схема с «преобразователем обратного хода» и имитацией нелинейности микрофона

На рисунке 4 представлены временная диаграмма и спектр, снятые в точке d. Видно, как искажается сигнал по сравнению с первоначальным. Изменился и спектр сигнала: появилась вторая гармоника на частоте 50 кГц, и на основной частоте 25 кГц появились дополнительные пики. В звуковом диапазоне наблюдается небольшой пик, но амплитуда очень мала.

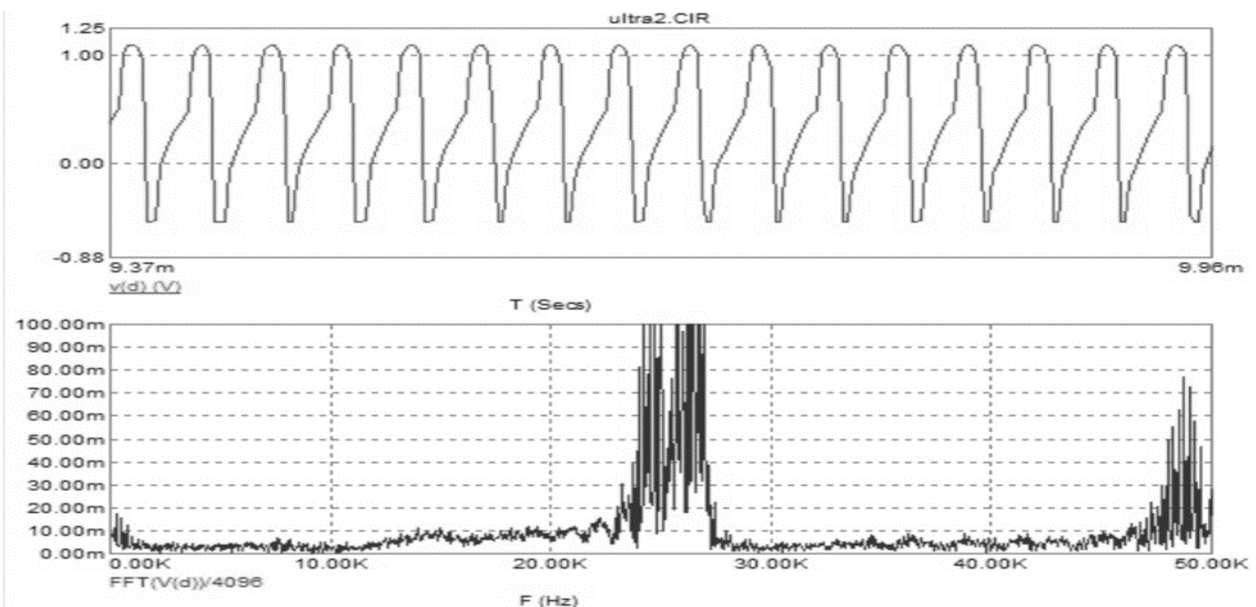


Рис. 4. Временная диаграмма и спектр на нелинейности

Для того, чтобы появилась частота достаточной амплитуды в звуковом диапазоне нужно взять еще один канал, но с другими частотоподающими компонентами.

Номиналы подбираются так, чтобы разность выходных частот каналов приходилась на звуковой диапазон (рис. 5).

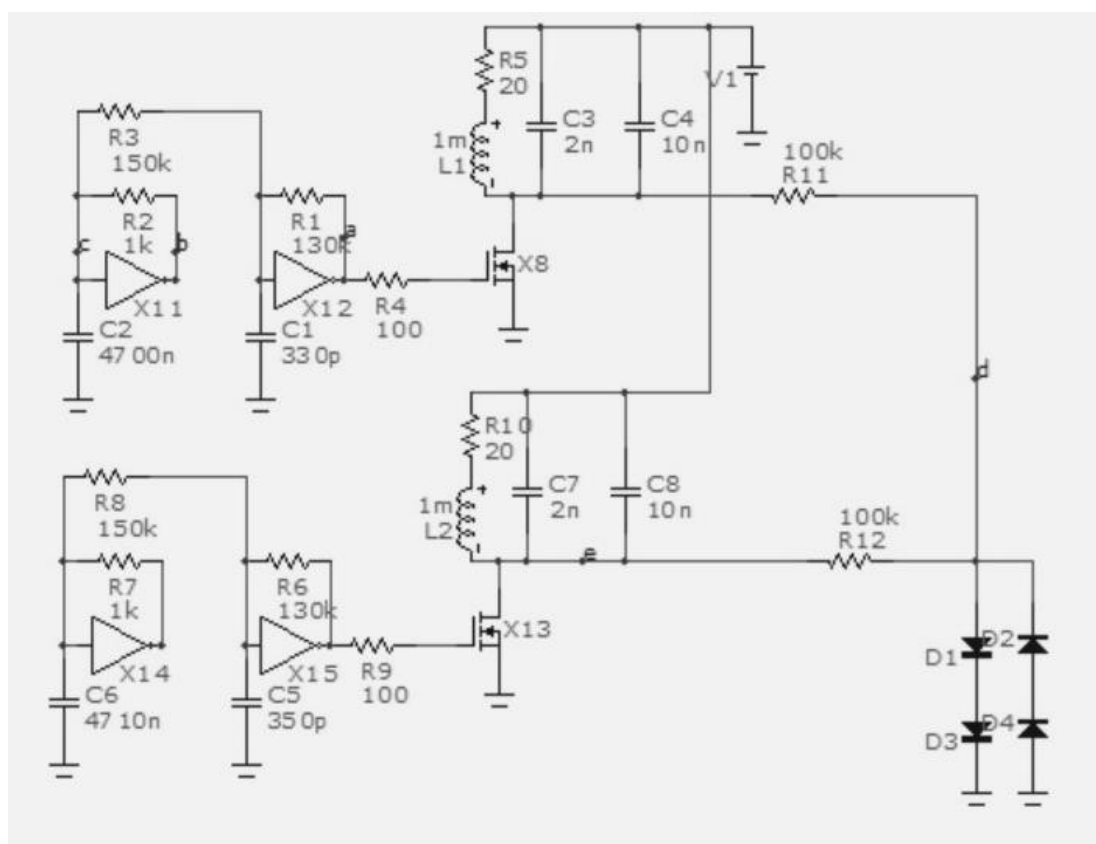


Рис. 5. Два канала модулированной ультразвуковой частоты с различными номиналами частотообразующих конденсаторов

В этом случае появляется разностная частота в районе 2-3 кГц, а это уже звуковая частота. Спектральный максимум приходится на 1 кГц, что не очень характерно для человеческого голоса, но сам факт появления разностной частоты говорит о жизнеспособности метода. Добавив еще один канал, с другими номиналами частотообразующих компонентов, можно получить полосу разностных частот в звуковом диапазоне довольно большой амплитуды. При этом на временной диаграмме видно, как сильно искажается выходной сигнал, по сравнению с предыдущими схемами (рис. 6).

Номиналы конденсаторов для трех каналов получены в ходе моделирования, однако в реальном макете они будут другими, поскольку в идеальной среде моделирования не учитываются такие факторы, как взаимное влияние генераторов друг на друга, реальные вольтамперные характеристики компонентов, влияние температуры и др. Однако, в процессе моделирования преследовалась цель не столько подобрать компоненты для реальной схемы, сколько сделать процесс моделирования более наглядным и проверить сам метод получения разностной частоты в звуковом диапазоне. Двухчастотный метод ультразвукового подавления описан в литературе, но подробное моделирование в компьютерной среде проведено впервые [3,4].

2 мощных ультразвуковых излучателя, генерируют две электромагнитных волны, с частотами, отличающимися друг от друга на 0,3 - 4 кГц. Эти две волны приходят на

нелинейный элемент микрофонного усилителя, и смешиваются, в результате чего получается сигнал с комбинационными частотами – суммарной и разностной. Разностная частота и выступает в виде помехи в звуковом диапазоне.

Недостатком этого метода является низкий коэффициент полезного действия, поскольку  $2/3$  выделяемой пьезоэлементом мощности расходуется «впустую», на ультразвуковых частотах. К достоинствам данного метода можно отнести скрытность, отсутствие слышимого шума, что делает использование такого рода устройств более комфортным, а также относительная простота реализации. Так же этот метод считается дешевым, хотя в процессе реализации устройства, было обнаружено, что стоимость пьезоизлучателей обратно пропорциональна их резонансной частоте.

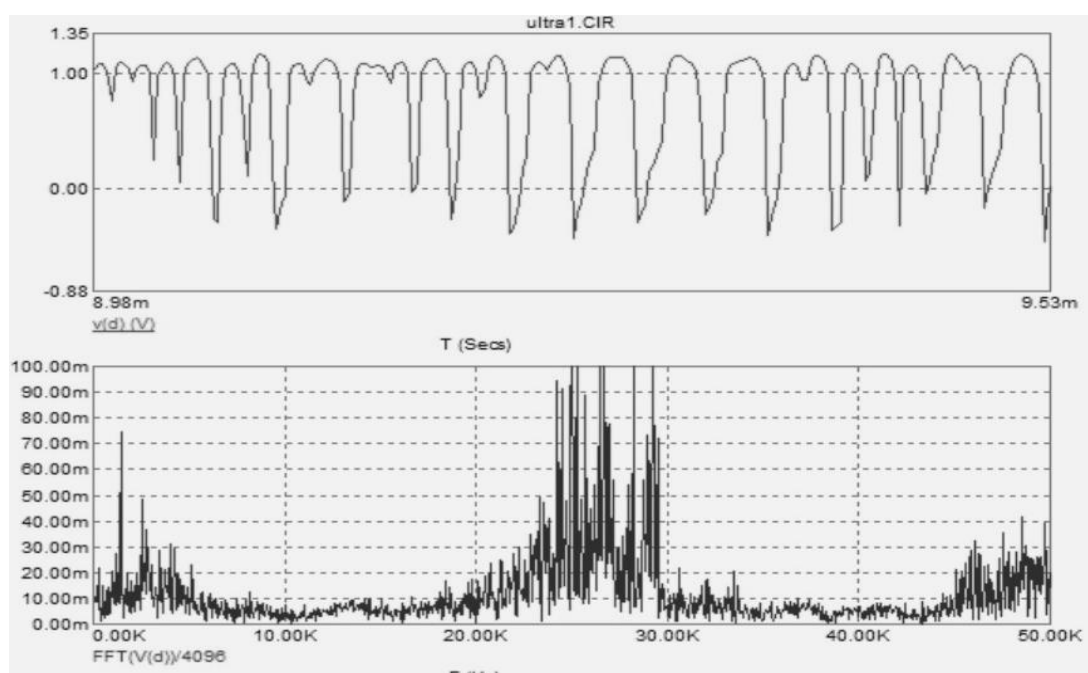


Рис. 6. Временная характеристика и спектр, снятые с трех каналов на нелинейности

**По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:**

- 1) Для того, чтобы получить генератор модулированной ультразвуковой частоты необходимо 2 триггера Шмидта с разными частотоподающими компонентами.
- 2) На нелинейности одноканальный генератор не дает гармоник в области звуковых частот.
- 3) Для получения частот в звуковом диапазоне на нелинейности необходимо как минимум 2 канала генерации, со смещенными друг относительно друга генерируемыми частотами.
- 4) Чем больше каналов, тем шире полоса получаемых звуковых разностных частот.
- 5) В идеальной среде моделирования проблематично точно подобрать компоненты для реального устройства, но возможно показать его принцип действия.

**Микрофоны для мобильных телефонов и радиозакладных устройств.** В настоящее время на рынке представлены 2 типа миниатюрных микрофонов: ECM (ElectretCondenserMicrophone) и MEMS (MicroElectroMechanicalSystems) [5,6]. Электретный микрофон мобильного телефона, диктофона или РЗУ часто прикрывается

фильтром из специального материала, ограничивающего полосу пропускания пределами звукового диапазона, или в схему микрофона внедряется фильтр нижних частот с граничной частотой ниже 0,3 - 4 кГц, пропускающий только аудиосигнал. Поэтому гармоники в ультразвуковом диапазоне не попадают в тракт микрофона и не могут оказать какого-либо действия, хотя на их генерацию расходуется значительная доля мощности. Однако, в смартфонах типа iPhone и многих других современных моделях, используются микрофоны MEMS, в виде микро-электромеханической системы, в которой акустический сигнал преобразуется в цифровой без процедуры низкочастотной фильтрации, да и в РЗУ для экономии места на схеме такие фильтры часто не ставятся. В данной работе проводились эксперименты с обоими типами микрофонов.

**Лабораторный макет ультразвукового излучателя.** По результатам моделирования, был изготовлен лабораторный макет ультразвукового излучателя, принципиальная схема которого представлена на рисунке 7. На практике, для получения разностной составляющей в звуковом диапазоне было достаточно двух каналов. В процессе работы, частоты ультразвуковых генераторов получают сдвиги порядка 100-400 Гц. Частоты модуляторов определяются их RC номиналами, которые указаны на схеме.

На одной микросхеме CD4093BD, которая представляет из себя 4 логических элемента 2И-НЕ, с триггерами Шмидта на выходах, собраны два генератора 24-25 кГц и два модулирующих их низкочастотных генератора.

В схемах генераторов используется один триггер, один конденсатор и один резистор. Все устройство вставлено в корпус вместе с пьезоизлучателями.

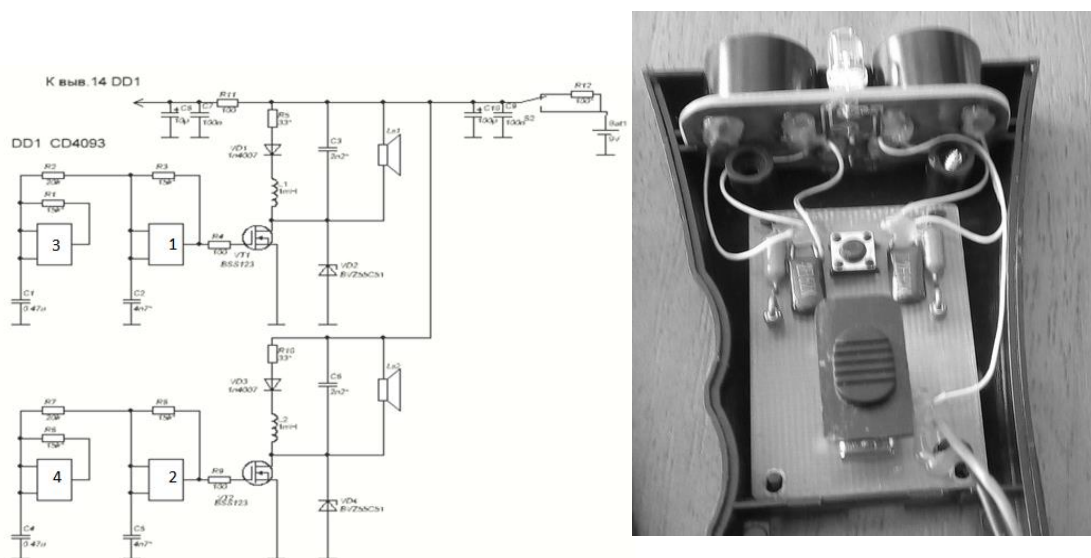


Рис. 7. Принципиальная схема и внешний вид ультразвукового подавителя

Кроме того был собран стенд со сменными микрофонами, представляющий из себя стойку и микрофонный предварительный усилитель на 2-х транзисторах, для снятия временных и спектральных характеристик.

**Методика экспериментов.** Схема установки для экспериментов представлена на рисунке 8, расстояние между источником звукового сигнала и микрофоном составляло 0,5 м. Микрофоны по очереди вставлялись в модуль усилителя, и выходной сигнал

выводился на осциллограф. Сначала на микрофон подавалась отдельно звуковая частота, снимались временные зависимости и спектры при выключенном ультразвуковом излучателе. Затем одновременно со звуком подавался ультразвук, и снова снимались временная и спектральная диаграмма. Звуковые частоты, подаваемые на микрофон: 1, 2, 3, 4, 5 и 6 кГц.

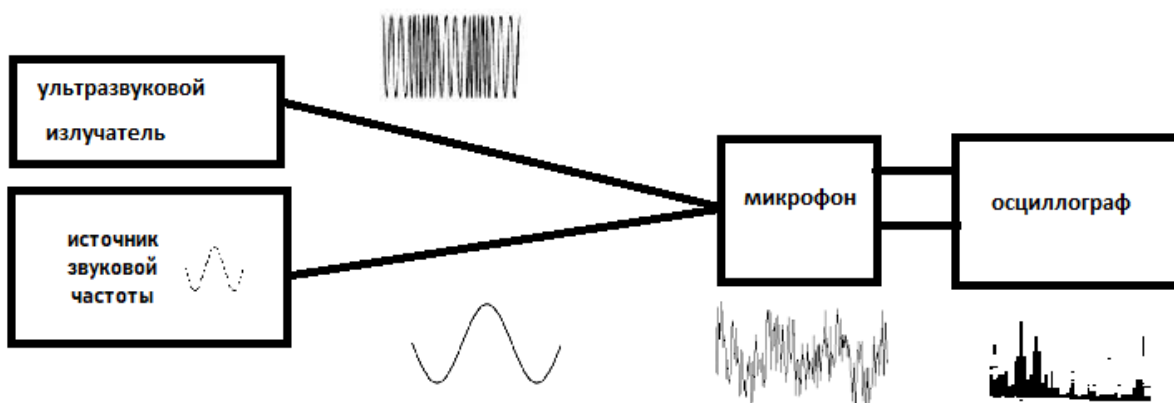


Рис. 8. Общая схема установки для снятия временных и частотных характеристик

**Результаты экспериментов.** На рисунках 7 и 8 представлены осциллограммы для звукового сигнала 1 кГц, снятые с выхода микрофона со включенным и выключенным излучателем ультразвука. Видно, как сильно искажается сигнал, при включенном излучателе. При этом, чем меньше был диаметр микрофона, тем больше были искажения.

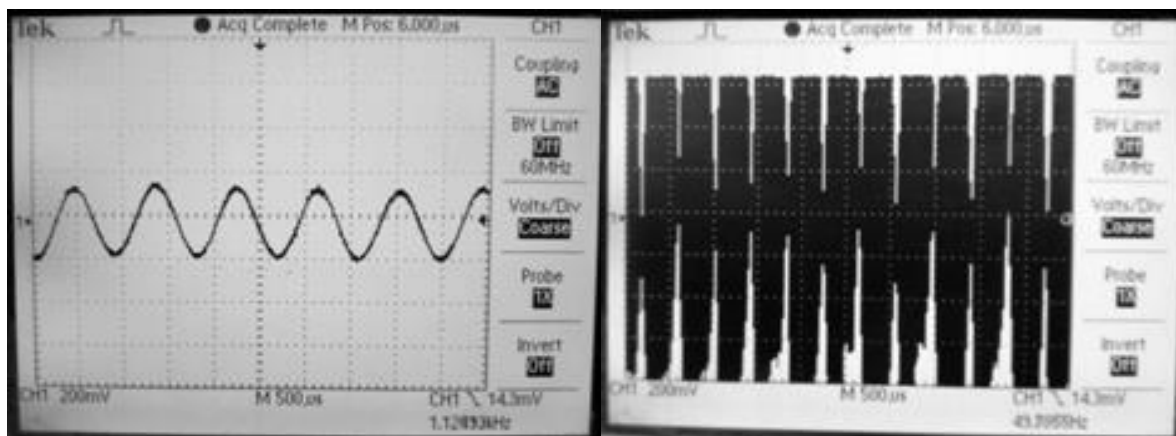


Рис. 9. Слева – звуковая частота 1 кГц, видны небольшие шумы на выходе микрофона; Справа - 1 кГц с ультразвуком, видны значительные искажения

На рисунке 10 представлены спектрограммы для звуковой частоты 5кГц с ультразвуком и без него. На частоте 23-25 кГц - ультразвук, и разностная составляющая в области низких частот.



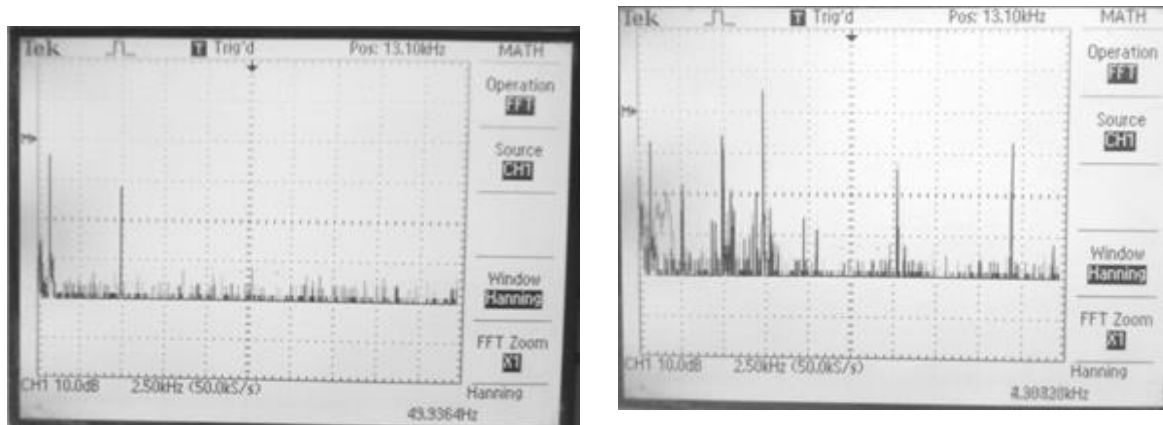


Рис. 10. Спектры. Слева - звуковая частота 5 кГц, справа – 5 кГц с ультразвуком, кроме ультразвуковой частоты 25 кГц, видны вторая гармоника на 50 кГц и разностные частоты в области 1-5 кГц

При попадании на микрофон двух смещенных друг относительно друга на 700 Гц ультразвуковых частот, встроенный усилитель микрофона переходит в нелинейный режим и получают гармоники, сумма и разность частот. Этот эффект сильно зависит от характеристик микрофона. Хотя производитель дает для всех микрофонов одинаковую чувствительность 52DB лучший результат дал образец микрофона, самых малых размеров. Однако выводов о зависимости от размеров микрофона делать нельзя, поскольку, микрофоны могут иметь разные схемы встроенных усилителей, с наличием или отсутствием фильтров звуковой частоты.

При настройке ультразвуковых генераторов важно, чтобы они работали на резонансной частоте пьезоэлементов, которые непосредственно и создают колебания. В нашем эксперименте резонансная частота пьезоизлучателей была неизвестна. Возможно ультразвук 25 кГц не попадал в резонанс с пьезоэлементом, это в результате могло понизить мощность излучения. Для усиления эффекта можно взять несколько разных излучателей, работающих на разных резонансных частотах. Таким образом, возможностью для улучшения работы устройства является повышение мощности, причем здесь важны согласованность схемы, излучателей и источника питания.

Главным достоинством метода является скрытность применения устройства, что и подтвердили эксперименты – никаких звуков не было слышно.

**Эксперименты с макетами РЗУ и диктофонами мобильных телефонов.** Для экспериментов были отобраны 3 лабораторных макета РЗУ, рассчитанные на диапазоны 88, 93 и 433 МГц. Сигнал РЗУ принимался usb-приемником SDRSharp на базе RTL2832U+R820T, затем на микрофон РЗУ наводился ультразвуковой подавитель. Спектры с сигналом РЗУ до включения устройства и после представлены на рисунке 11. При наложении ультразвука в спектре появляются дополнительные гармоники, часть которых сносится на более высокие частоты. Спектр несущей становится шире и в наушниках слышен характерный треск, перекрывавший звуковой сигнал, который не убирается ни включением автоматической регулировки уровня сигнала, ни переключением вида модуляции.

Для проверки устройства на микрофонах реальных мобильных телефонов и смартфонов были проведены эксперименты с устройствами 27-ми популярных моделей.

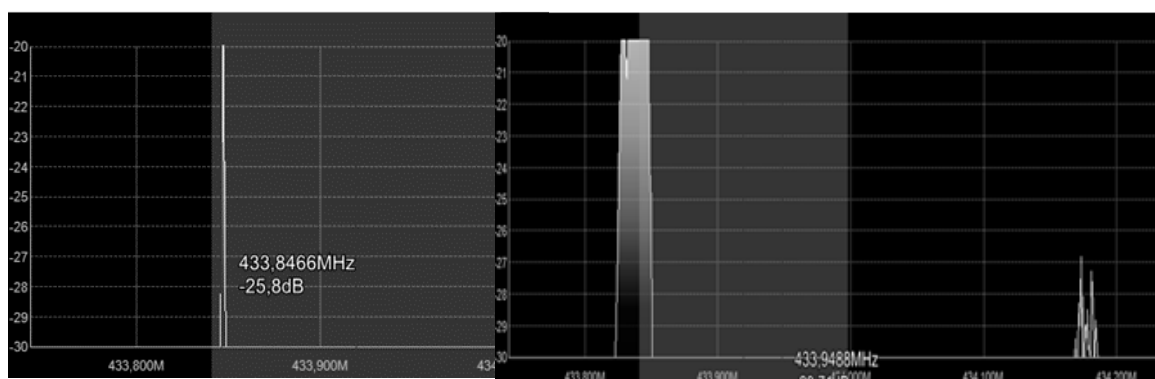


Рис. 11. Слева - спектр сигнала макета РЗУ, несущая 433 МГц, справа – с наложением ультразвуковой частоты

Мобильный телефон включался в режиме диктофона, шла запись, затем вблизи телефона включался ультразвуковой подавитель и оценивалось качество записываемого звукового сигнала по четырехбалльной шкале, причем аудирование осуществлял один и тот же экспериментатор, чтобы исключить различие в восприятии звуковой информации разными людьми. Затем результаты подавления и модель телефона заносились в таблицу. Количественно подавление оценивалось по четырехбалльной шкале: -- голос хорошо слышен и не слышен шум, +- голос слышен, но разобрать можно не все, + - голос слышен, но разобрать невозможно ничего, ++ - голос не слышен, только шум. Данные для некоторых моделей мобильных телефонов представлены в таблице 1

Таблица 1. Подавление микрофонов мобильных телефонов различных моделей

Модель телефона	Подавление	Тип микрофона	Вес микрофона
XIAOMI redmi 4	++	MEMS	0,001
XIAOMI redmi 3S	++	ECM	0,001
XIAOMI redminote 4(4)	++	ECM	0,001
ZTE 790	+-	ECM	0,005
Lenovo A916	+-	ECM	0,001
NOKIA Lumia 640	--	MEMS	0,001
NOKIA Lumia 920	--	MEMS	0,001
NOKIA 2710C2	--	ECM	0,005

**Выводы.** При подаче на микрофон мобильного телефона, диктофона или радиозакладного устройства ультразвукового сигнала частотой 24-25 кГц, модулированного частотой 250 – 400 Гц с двух каналов, с разницей частот 400 – 1000 гц, сигнал искажается на нелинейностях микрофонного тракта. Этот процесс можно наблюдать, изучить и рассчитать в идеальной модели. В реальном устройстве на характеристики излучаемых сигналов влияют множество факторов, таких как отклонения в номиналах компонентов, самовозбуждение колебательных контуров, резонансная частота ультразвукового излучателя и взаимное влияние частотоподающих и модулирующих генераторов друг на друга.

Ультразвуковой подавитель с мощностью выходного сигнала 0,1 мВт полностью подавил звуковой сигнал 40%, участвовавших в эксперименте, популярных моделей мобильных телефонов и смартфонов, и 19 % заглушил частично, микрофоны макетов РЗУ

также заглушил частично. Эффективность подавления сигнала микрофона зависит от типа, размеров и производителя микрофона. Не подтвердились, приведенные в литературе [3] данные, что MEMS микрофоны подавляются значительно лучше, потому что не содержат на входе фильтров низкой частоты. Из 9-ти MEMS микрофонов было подавлено 4, а из 18-ти ЕМС микрофонов было подавлено 10, и 5- частично подавлено.

Для полного закрытия информации ультразвуковые подавители микрофонов целесообразно применять совместно с генераторами белого шума и речеподобной помехи, если скрытность применения подобного устройства, не играет большого значения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олейников А. Н. Ультразвуковые методы защиты речевой информации / А. Н. Олейников, В. А. Пулавский, М. А. Кривенко // Радиотехника. – 2012. – Вып. 169. – С. 176-181.
2. Хоровиц П. Искусство схемотехники : пер. с англ. / П. Хоровиц, У. Хилл. – 6-е изд. – Москва : Мир, 2003. – 704 с., ил.
3. Roy N. BackDoor: Making Microphones Hear Inaudible Sounds / N. Roy, H. Hassanieh, R. Roy Choudhury // Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. – 2017. – P. 2–14.
4. Messages behind the sound: real-time hidden acoustic signal capture with smartphones / Q. Wang [et al.] // In Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. – New York, 2016. – P. 29-41.
5. Electret condenser microphone. US Patent 5,097,515. Baba. Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. March 17, 1992.
6. MEMS digital-to-acoustic transducer with error cancellation. US Patent 7,019,955. Loeb, et al. Carnegie Mellon University. March 28, 2006.

*Поступила в редакцию 07.09.2018 г.*

#### THE SIGNAL SPECTRUM CHANGES FOR ULTRASONIC RADIATION INTERACTION WITH NONLINEAR ELEMENTS OF ELECTRETS MICROPHONES SOUND TRACT

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

In this paper, simulation and experimental study are carried out for the modulated ultrasound effect on nonlinear elements of ECM and MEMS microphones of mobile phones in the dictophone mode and 433 MHz band radio sets.

**Keywords:** ultrasonic generator, generator on the Schmidt trigger, EMC and MEMS microphones, suppression of microphones by ultrasound.

**Бабичева Маргарита Вадимовна,** ст. **Babicheva Margarita**  
преподаватель кафедры радиофизики и Donetsk National University  
инфокоммуникационных технологий.  
E-mail: m.v.babicheva60@gmail.com

**Попов Александр Сергеевич,** **Popov Alexander**  
студент кафедры радиофизики и Donetsk National University  
инфокоммуникационных технологий.  
E-mail: logan2009@i.ua

**Яновский Александр Вадимович,** **Yanovsky Alexander**  
студент кафедры радиофизики и Donetsk National University  
инфокоммуникационных технологий.  
E-mail: alexyana1994@mail.ru

И Н Ф О Р М А Т И К А , В Ы Ч И С Л И Т Е Л Ь Н А Я  
Т Е Х Н И К А И У П Р А В Л Е Н И Е

УДК 004.89

ОБРАБОТКА ДАННЫХ СИСТЕМАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА  
ПРИ РЕШЕНИИ ЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

© 2018 А.В. Шалаев, В.В. Демёхин

В настоящей работе описан метод реализации параллельных логических вентилях. Рассмотрена реализация параллельной логики для двухградационных картин на основе топологической обработки данных. Выполнено сравнение эффективности обработки информации системами топологической обработки информации с оптоэлектронными цифровыми вычислительными системами и системами цифровой электроники по таким параметрам как плотность обработки информации и энергетическая добротность.

**Ключевые слова:** Параллельная обработка данных, интеллектуальная система, логический вентиль, оптический канал, топологическая обработка информации, нейронные сети, оптический канал, распознающие системы, линия задержки.

**Введение.** Производительность современных систем искусственного интеллекта, решающих задачи логической обработки данных, управления, распознавания образов и др., пока еще значительно уступает производительности человеческого мозга. Так, например, знакомое лицо в незнакомом окружении мозг распознает за 100—200 мс. Для решения аналогичных задач компьютеру требуется несколько дней [1]. Несмотря на то, что скорость реакции нейронов ( $10^{-3}$  с) на 5—6 порядков меньше скорости реакции кремниевых логических элементов ( $10^{-9}$  с), мозг быстрее и лучше справляется с подобными задачами. Энергетические затраты мозга на выполнение одной операции в секунду составляют около  $10^{-16}$  Дж, а затраты самого экономного компьютера сегодня не опускаются ниже  $10^{-6}$  Дж. Производительность и потребляемая мощность системы искусственного интеллекта в значительной степени зависит от используемой элементной базы. Наиболее радикальные позитивные изменения элементной базы могут быть достигнуты применением новых средств и методов обработки данных.

Для решения задач распознавания образов в [2] предложен метод топологической обработки информации (ТОИ). Его сущность заключается в автоматическом изменении топологии стохастических связей между элементами распознающей системы (РС), при котором все предъявляемые на вход РС цифровые изображения оказываются правильно разделенными на два класса. Обучение РС в [2] осуществлялось с помощью ЭВМ. Экстраполяция метода ТОИ на процессы выполнения логических операций позволит заменить ЭВМ оптическими цифровыми устройствами, выполненными на элементной базе, аналогичной распознающим ТОИ-системам. Все многообразие функций ЭВМ может быть выполнено частью элементов и узлов РС без существенных изменений ее общей структуры [2].

**Постановка задачи.** Возникает задача рассмотрения особенностей построения систем логических вентилях на основе метода топологической обработки информации и оценка их параметров.

**Метод ТОИ.** При распознавании образов и реализации логических функций для метода ТОИ характерно: расщепление входных сигналов по  $n$  оптическим каналам (ОК); установление определенной топологии связей между оптическими элементами, т.е. образование распределения ОК по адресам двумерной или одномерной матрицы, исполняющей роль пространственного фильтра; изменение топологии связей между оптическими элементами посредством блокирования и/или добавления ОК под управлением входных сигналов;- определение результата обработки данных по количеству оптических сигналов, поступающих на выход логического или распознающего устройства, не зависящего от их амплитуды, фазы, поляризации и т. д.

Число связей, вид распределения ОК по адресам матрицы и характер изменения топологии связей зависит от условия решаемой задачи. Метод ТОИ справедлив и для гальванических связей с заменой оптических дискретных сигналов на электрические. Учитывая, что в основе одного из вариантов параллельного выполнения логических операций лежит рассматриваемый ниже эффект “многоцветной” памяти [3, 4], дальнейшее изложение относится к оптическому варианту ТОИ.

Процессы реализации логических функций методом ТОИ можно рассматривать как частный случай процесса распознавания образов интеллектуальными ТОИ-системами. Единство элементной базы и процессов обработки данных дает право считать, что ТОИ-системы искусственного интеллекта способны не только классифицировать изображения, но и решать различные арифметические и логические задачи. Однако применение ТОИ к логическим вентилям (ЛВ) имеет ряд специфических особенностей. Как и в случае распознавания изображений методом ТОИ, на вход ЛВ поступают данные в виде дискретных оптических сигналов. Количество «изображений», предъявляемых в любом порядке, уменьшается до четырех: 00, 01, 10 и 11. Число классов на выходе ЛВ также равно двум (кроме случаев логических функций 0 и 1), а количество независимых РС увеличивается до 16 (табл. 1).

Таблица 1. Логические функции двух переменных

Вход		Выход															
A	B	F <sub>0</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>8</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>10</sub>	F <sub>11</sub>	F <sub>12</sub>	F <sub>13</sub>	F <sub>14</sub>	F <sub>15</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
ПЛ	0	$A \cdot B$	$A \cdot \bar{B}$	$A$	$\bar{A} \cdot B$	$B$	$A \oplus B$	$A + B$	$\overline{A + B}$	$\overline{A \oplus B}$	$\bar{B}$	$A + \bar{B}$	$\bar{A}$	$\bar{A} + B$	$\overline{A \cdot B}$		1

ПЛ - положительная логика;  $\cdot$  - логическое произведение (И);  $+$  - логическое сложение (ИЛИ);  $\oplus$  - операция ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ;  $\bar{\phantom{x}}$  - логическое отрицание (НЕ).

Наличие всего четырех «изображений» на входе позволяет заменить стохастические связи детерминированными и значительно сократить их количество. Топология связей, ее изменение и количество связей зависят от вида реализуемой логической функции. При этом необходимость в пороговом элементе, обладающем двумя устойчивыми состояниями, (в [2] его роль выполняет матрица ассоциативных элементов) есть не для всех ЛВ. Число ЛВ, не использующих нелинейные элементы, равно шести, и они реализуют логические функции  $F_0, F_1, F_3, F_5, F_7, F_{15}$ . Быстродействие этих ЛВ будет максимальным, а количество элементов — минимальным, поскольку в их состав входят лишь два входных лазерных диода, мультипликатор, ОК и выходной логический вентиль И.

Мультипликатор предназначен для расщепления лазерного пучка на необходимое число пучков. Он может быть выполнен на основе матрицы голограмм [5], специальных интегрально-оптических разветвителей [6] или других оптических систем. ОК может быть реализован как через открытое пространство, так и на основе оптического волокна. Логический элемент И на выходе всех ЛВ на основе ТОИ имеет  $k=2-3$  пространственно разделенных входа и дает на выходе 1, если на все  $k$  входов поступает одно временно  $k$  или больше оптических сигналов, и 0, если оптический сигнал не поступает хотя бы на один из его входов.

Время совершения одной логической операции

$$t = t_{ЛД} + t_P + t_{ФП},$$

где  $t_{ЛД}$  – время излучения лазерного диода;  $t_P$  – время распространения сигнала по ОК;  $t_{ФП}$  – время срабатывания фотоприемника логического вентиля И.

Для остальных десяти ЛВ к времени  $t$  необходимо добавить еще  $t_{П}$  - время переключения светоклапанной ячейки из не пропускного состояния в пропускное или наоборот. Наибольшая задержка сигнала происходит именно на этом переключательном элементе. Так, время переключения жидкокристаллического управляемого транспаранта около 20 мкс [6]. Созданный на основе интерферометра Фабри - Перо трансфазор [6] может переключаться за время, измеряемое долями пикосекунды. Однако на пути промышленной реализации трансфазора и вычислительных устройств на его основе имеется ряд трудностей, отмеченных в [5].

Применение метода ТОИ возможно как в схемах в интегральном исполнении, так и в оптоэлектронных системах, использующих двумерные входной и выходной каналы. Параллельный доступ к логическим элементам оптоэлектронной схемы позволяет поднять функциональную производительность этой схемы. Общее число индивидуально управляемых полупроводниковых лазерных диодов и фотоприемных элементов соответствующих матриц соизмеримо с числом ЛВ ( $10^6 \dots 10^8$ ) [6]. Оптические схемы ЛВ на основе ТОИ по конструктивным особенностям можно разделить на две равные группы. К первой относятся ЛВ, которые дают на выходе 0,

при входе 00 (функции  $F_0 - F_7$ ). Типичным представителем этой группы является оптическая схема ЛВ, реализующая логическую функцию  $F_5 = B$  (рис. 1).

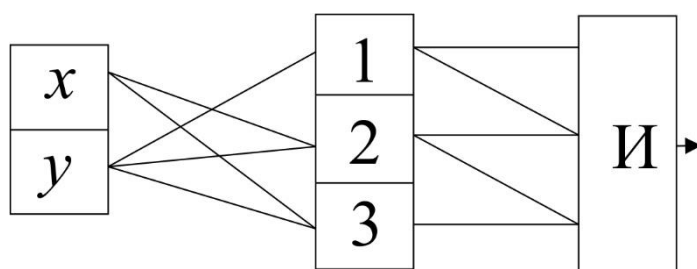


Рис. 1. Структурная схема однослойного логического устройства.  
 $x, y$  – входные ячейки, И – логический вентиль

Для реализации логических функций достаточно образовать оптические связи с двумя-четырьмя ячейками пространственного фильтра (за исключением  $F_9$ ), часть которых будет всегда открыта. Логические устройства функций  $F_0 = 0$ ,  $F_1 = A \cdot B$ ,  $F_3 = A$ ,  $F_5 = B$ ,  $F_7 = A + B$ ,  $F_{15} = 1$  также не имеют пороговых нелинейных элементов, принадлежащих к системе фильтрации (СФ) (рис. 2) и осуществляющих пространственную фильтрацию оптических сигналов под управлением входных сигналов.

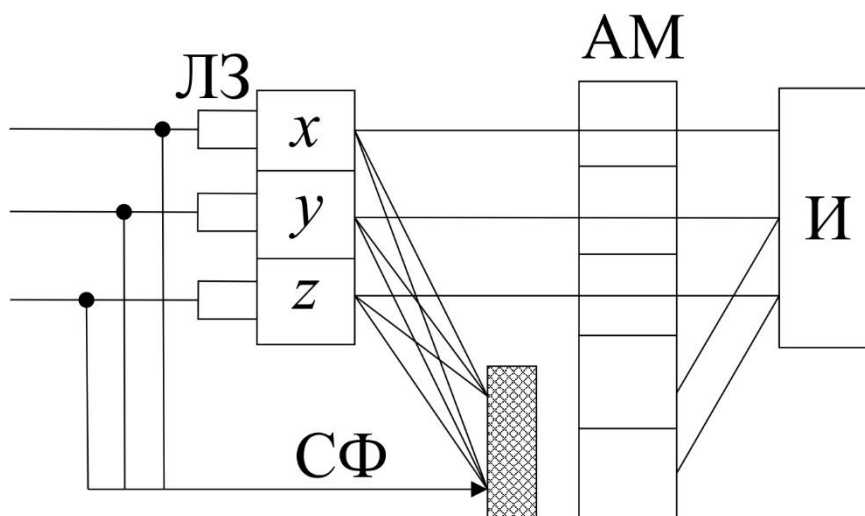


Рис. 2. Структурная схема однослойного логического устройства.  
 $x, y$  – входные ячейки, И – логический вентиль, ЛЗ – линия задержки, СФ – система фильтрации сигналов, АМ – матрица ассоциативных элементов

Схемы логических устройств, предназначенных для реализации логических функций, принимающих значение 1 при значении на входе 00, имеют три входных ячейки, расположенные в плоскости матрицы входов и пять ячеек ассоциативной матрицы АМ (рис. 2). СФ состоит из световодных ответвителей [6], расположенных перед матрицей входных элементов, линий задержки (ЛЗ) и переключаемого элемента (заштрихован). При одновременном действии двух или трех входных оптических сигналов переключаемый элемент становится непрозрачным к моменту их поступления на АМ, так как управляющие ответвленные сигналы поступают на него раньше. Эта

задержка во времени на величину  $\tau$ , равную времени включения переключаемого элемента, обеспечивается ЛЗ.

В табл. 2 приведены распределения выходных сигналов по адресам АМ всех шестнадцати ЛВ из табл. 1. Функции приведены в верхней строке табл. 2. Каждой последующей строке соответствует сочетание операндов первых двух столбцов табл. 1.

Таблица 2. Распределение выходных сигналов по адресам АМ

$F_0 = 0$		$F_1 = A \cdot B$		$F_2 = A \cdot \bar{B}$			$F_3 = A$			$F_4 = \bar{A} \cdot B$			$F_5 = B$		$F_6 = A \oplus B$				$F_7 = A + B$			$F_8 = \overline{A + B}$	
1	2	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	3	4	1	2	3	1	2
																						1	1
	1		1		1	1		1	1	1	1	1	1	1		1	1	1		1	1		
1		1		1	1	1	1	1	1		1	1		1	1		1	1	1		1		
1	1	1	1	1			1	1	1	1	1		1	1	1	1			1	1	1		

Продолжение таблицы 2

$F_9 = \overline{A \oplus B}$					$F_{10} = \bar{B}$			$F_{11} = A + \bar{B}$				$F_{12} = \bar{A}$			$F_{13} = \bar{A} + B$			$F_{14} = \overline{A \cdot B}$				$F_{15} = 1$			
1	2	3	4	5	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4			
		1	1	1		1	1			1	1		1	1		1	1		1	1	1	1			
	1	1							1			1	1		1	1		1	1	1		1			
1		1			1	1	1	1		1	1		1		1		1	1	1	1	1	1			
1	1	1			1			1	1			1		1	1		1	1		1	1	1			

Логические вентили представляют собой упрощенный вариант распознающей ТОИ-системы. Упрощение заключается в уменьшении числа ячеек АМ и соответствующих им связей, отсутствии предварительной фильтрации сигналов, а при реализации логических функций  $F_0, F_1, F_3, F_5, F_7, F_{15}$  – в полном отсутствии фильтрующих элементов. Последнее обстоятельство, а также отсутствие светоклапанных ячеек примерно у половины ячеек АМ, принадлежащих остальным десяти ЛВ, позволили значительно увеличить тактовую частоту и, следовательно, энергетическую добротность и плотность обработки данных.

Выполнено сравнение эффективности обработки данных ТОИ-системами с оптоэлектронными цифровыми вычислительными системами и системами цифровой электроники по таким параметрам как плотность обработки данных и энергетическая добротность. Согласно [6], для воздушно-охлаждаемых интегральных схем предельное число операций в секунду (оп./с) на единицу площади схемы составляет  $N = 10^{10}$  оп./с. За счет параллельной организации в оптоэлектронных логических схемах [6] удастся повысить производительность до  $N = 10^{12}$  оп./с, а в оптических цифровых многоканальных вычислительных устройствах [5] — до  $N = 10^{13}$  оп./с.

В оптоэлектронных схемах на основе ТОИ входной и выходной каналы к логической схеме также являются двухмерными, что обеспечивает одновременный доступ ко всем элементам схемы. В отличие от оптоэлектронных схем [6], площадь пространственно-временных модуляторов света, блокирующих часть ячеек АМ, в безлинзовых ТОИ-системах значительно меньше. Уменьшается также разность хода в оптической системе (не превышает размеров оптических элементов  $L$ ). Временное



рассогласование для различных элементов такой системы должно быть не более определенной доли  $\gamma$  от тактового периода  $T = 1/f_\tau$ . При  $\gamma = 1/30$  максимально допустимая тактовая частота  $f_\tau = \gamma c/L = 10^{10}$  Гц при  $L = 10^{-3}$  м, что в  $10^2$  раз больше, чем в [6]. Энергетическая добротность выражается числом операций на единицу затраченной энергии:

$$K = \frac{m}{PT},$$

где  $m$  – коэффициент разветвления сигнала на выходе системы;  $P$  – мощность источника питания.

Таким образом, при тех же значениях  $P$  и  $m$  энергетическая добротность логических элементов возрастет в  $10^2$  раз. Плотность обработки информации прямо пропорциональна  $K$ , поэтому она также возрастает в  $10^2$  раз.

Параллельная обработка больших массивов данных методом ТОИ может быть организована как путем реализации картинной логики (в результате действия над двухградационными картинками на выходе также получается двухградационное изображение), так и путем использования одновременной обработки данных по нескольким спектральным каналам (логическая обработка многоградационных картин). Количество параллельных потоков данных  $\Omega$ , обрабатываемых в двухмерной области, равно отношению полного количества ячеек АМ к среднему количеству ячеек одного логического вентиля. В приведенных выше примерах количество ячеек этих элементов равнялось 3-4. Если линейный размер одной ячейки АМ около 10 мкм, то АМ размером 1х1 см содержит около  $10^6$  ячеек и  $\Omega \approx 3 \cdot 10^5$ .

При использовании для параллельной обработки данных  $n$  дискретных значений длины волны  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_m$ , количество битов, одновременно обрабатываемых каждой ячейкой, возрастет еще в  $n$  раз. Если АМ состоит из отражательных элементов, то для такой  $n$ -уровневой обработки требуется, чтобы каждая ячейка могла принимать  $2^n$  бинарных состояний. Например, для  $n=3$  это 000, 001, 010, 011, 101, 110, 111. Каждый 0 соответствует значению квадрата модуля коэффициента отражения света  $|r|_{\min}^2$ , а 1 – значению  $|r|_{\max}^2$  на соответствующей длине волны. В работе [3] была показана достижимость таких бинарных состояний для  $n=2$  и  $n=3$ , а в работе [4] для  $n \approx 10$ . Использование двойного параллелизма (по спектру и по двухмерному расположению ЛВ) при выполнении логических операций методом ТОИ позволяет осуществлять более миллиона операций за один такт, что при тактовой частоте  $10^{10}$  Гц дает производительность матричного ТОИ-процессора  $10^{16}$  оп./с.

**Выводы.** Рассмотренная распознающая система, основанная на автоматическом изменении топологии оптической или гальванической связи, может одновременно выполнять функции арифметического и логического устройств при соответствующей настройке фильтрации каналов связи на отведенных для этого участках АМ. Построение методом ТОИ простых и быстродействующих логических устройств позволяет создавать матричное арифметическое устройство с аналогичными параметрами. Эффект “многоцветной” памяти дает возможность реализовать оптическими методами параллельную логику над многоградационными переменными. Использование “многоцветного” эффекта позволяет увеличить производительность ЛВ

до  $10^{16}$  оп./с. Преимуществом метода ТОИ является возможность реализации полного набора логической функции в однослойной ТОИ-системе, а также отсутствие проблемы линейной разделимости функций, свойственной однослойной нейронной сети.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хайкин С. Нейронные сети : полный курс / С. Хайкин. – Москва : Вильямс, 2006. – 1104 с.
2. Демехин В. В. Распознавание зрительных образов на основе топологической обработки информации / В. В. Демехин, В. В. Данилов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2007. – № 3. – С. 24-29.
3. Демехин В. В. Вертикальная запись информации для оптических ЗУ / В. В. Демехин // Автометрия. – 1997. – № 6. – С. 67-71.
4. Демехин В. В. Обработка, передача и хранение k-уровневой информации при использовании m-частотных ( $m > k$ ) оптических сигналов / В. В. Демехин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2001. – № 5. – С. 64-67.
5. Вербовецкий А. А. Современные нетрадиционные методы построения цифровых многоканальных оптических логических схем / А. А. Вербовецкий // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1998. – № 4. – С. 16-48.
6. Вербовецкий А. А. Современные методы создания оптической цифровой вычислительной техники / А. А. Вербовецкий // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1999. – № 6. – С. 12-51.

*Поступила в редакцию 03.09.2018 г.*

#### PROCESSING OF DATA BY SYSTEMS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DECISION OF LOGICAL PROBLEMS

*A. Shalaev, V. Demyokhin*

In this paper, a method for implementing parallel logic gates is described. The implementation of parallel logic for two-gradation patterns based on topological information processing is considered. Comparison of the efficiency of information processing by the systems of topological information processing with optoelectronic digital computer systems and digital electronics systems is performed on such parameters as information processing density and energy quality factor.

**Keywords:** Parallel processing of data, intellectual system, logic gate, optical channel, topological information processing, neural networks, optical channel, recognition systems, delay line.

**Шалаев Андрей Васильевич**

аспирант ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк;  
E-mail: [pers2tz.ru@mail.ru](mailto:pers2tz.ru@mail.ru)

**Shalaev Andrey**

Postgraduate student at Donetsk National University, Donetsk

**Демёхин Виктор Владимирович**

аспирант ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк;

**Demyokhin Victor**

Postgraduate student at Donetsk National University, Donetsk

УДК 50.41.29

## ИТЕРАТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ПОРОГОВОЙ БИНАРИЗАЦИИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОТПЕЧАТКОВ ПАЛЬЦЕВ В БИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ДОСТУПА

© 2018 М.В. Бабичева, А.С. Юрченко

---

Предлагается метод итеративной пороговой бинаризации изображений отпечатков пальцев. Проанализированы специфические особенности изображений отпечатков пальцев и их влияние на результат бинаризации известными универсальными методами. Основу предложенного метода составляет итерационный алгоритм с краевой обработкой изображений, позволяющий автоматизировать поиск порога бинаризации. В работе представлено алгоритмическое описание метода, его сравнение с известными методами бинаризации, результаты применения на реальных изображениях.

**Ключевые слова:** растровое изображение, бинаризация, отпечатки пальцев, порог бинаризации, яркость, оттенок серого.

---

**Введение.** Разработка биометрической аппаратуры для аутентификации пользователей, требует специальных методологических, алгоритмических и программных средств. В рамках этих средств необходимо оптимальным образом учитывать характер и уникальные особенности пространственно-топологической структуры и геометрии изображений, специфику реализуемых целевых функций и используемого технического обеспечения, а также диктуемые ими ограничительные условия. По существу, речь идет о необходимости внедрения новых высокопроизводительных гибких технологий преобразования и анализа дактилоскопической информации, представляющих собой эффективную альтернативу универсальным классическим методам теории цифровой обработки изображений, применяемым в этой области. Операция бинаризации изображения является одной из наиболее важных поэлементных преобразований, предшествующих процессу анализа и распознавания изображений. Она заключается в сопоставлении значения яркости каждого пикселя изображения с заданным значением порога. Выбор соответствующего значения пороговой величины дает возможность выделения на изображении областей определенного вида. Пороговая обработка изображения может проводиться разными способами: бинаризация с нижним и верхним порогами, методы Отцу, Эйквилья, Ниблэйка, Бернсена, Собеля, Канни, Первитта, причем каждый метод имеет свою область применения [1]. В данной работе предложен метод бинаризации растровых изображений отпечатков пальцев, который гарантирует высокое качество и полную автоматизацию процесса предварительной цифровой обработки.

**Постановка задачи.** Целью работы является в разработка и реализация эффективного алгоритма бинаризации изображений, адаптированного под специфические особенности изображений отпечатков пальцев. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- определить специфические особенности изображений отпечатков пальцев, влияющие на результат бинаризации;
- предложить собственный алгоритм обработки изображений;
- реализовать алгоритм бинаризации растровых изображений отпечатков пальцев;

- сравнить результаты работы собственного алгоритма с результатами работы известных алгоритмов;
- проанализировать полученные результаты.

**Существующие алгоритмы бинаризации.** Итеративный алгоритм бинаризации разработан как альтернатива методу Отцу, который определяет первоначальное пороговое значение яркости при помощи анализа гистограммы изображения. Метод Отцу широко применяется в цифровой обработке изображений и дает хорошие результаты при работе с изображениями отпечатков пальцев, если гистограмма изображения носит четко выраженный бимодальный характер. Однако, метод Отцу не гарантируют, что пиксели, относящиеся к одной и той же моде распределения яркостей, лежат на изображении рядом, образуя связные области. Гистограмма содержит только лишь информацию о частоте встречаемости на изображении пикселей с различными уровнями яркости, но не содержит информации об их пространственном распределении. Это является основным недостатком использования гистограмм для сегментации изображений. Однако, несмотря на то, что результаты, получаемые с помощью гистограмм, не всегда являются удовлетворительными, данный метод широко используется, так как является простым и быстрым [2].

Локальная пороговая обработка характеризуется тем, что изображение разбивается на подобласти, в каждой из которых для сегментации используется свое значение порога. Основные проблемы при таком подходе – это, разбить исходное изображение и оценить порог для каждой полученной области, что занимает гораздо больше времени и не гарантирует хорошего качества бинаризации всего изображения. Это методы Эйквилья, Ниблэйка, Бернсена, которые хорошо себя зарекомендовали в обработке медицинских и спутниковых изображений, где важной задачей является выявление мелких деталей, в ущерб скорости работы алгоритма [3].

Алгоритмы выделения контуров: методы Робертса, Превитта и Собеля также используются для получения бинарных изображений. Указанные методы основываются на одном из базовых свойств сигнала яркости – разрывности. Поиск разрывов производится с помощью скользящей маски, называемой также фильтром, ядром, окном или шаблоном, которая представляет собой некую квадратную матрицу, соответствующую указанной группе пикселей исходного изображения. Однако они совмещают бинаризацию с выделением контуров и также не гарантируют удовлетворительных результатов при этом отнимая много ресурсов и времени. Таким образом разработка простого, быстрого и эффективного метода бинаризации является актуальной как часть задачи распознавания отпечатков пальцев [4].

**Описание итерационного алгоритма.** В основу разработанного алгоритма положен метод простых итераций, который широко применяется для решения трансцендентных и нелинейных уравнений [5]. Входными данными рассматриваемого алгоритма являются сканы отпечатков, полученные со сканера Microsoft 1033, представляющие из себя полутоновые изображения (рис 1).



Рис. 1. Сканер отпечатков Microsoft 1033 и полученное с него полутоновое изображение

Общая схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 2. На вход поступает полутоновое изображение  $L$ . Из формата `uint8` матрица яркости переводится в формат `double`. Затем определяются размеры и находится начальный порог бинаризации, как сумма яркости пикселей всего изображения. На этом этапе происходит обработка края.

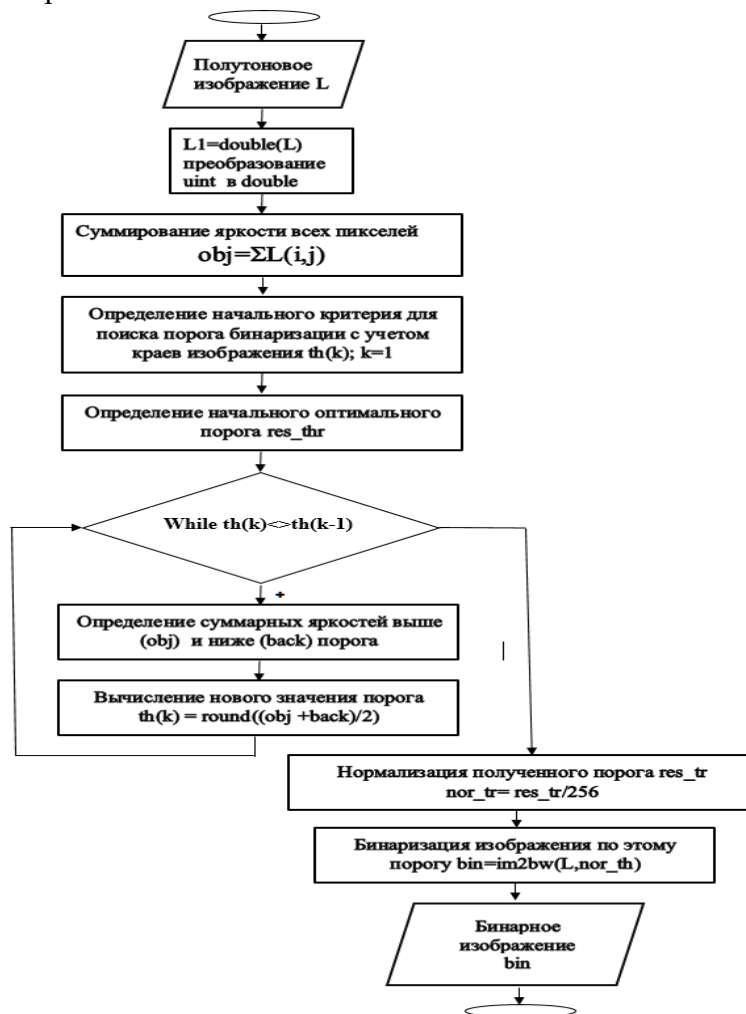


Рис. 2. Блок-схема итерационного алгоритма пороговой бинаризации

Поскольку основную информацию об отпечатке пальца несет центральная часть изображения, а края часто бывают засвечены и затемнены, вследствие особенностей сканирования, некоторое количество краевых пикселей изображения необходимо отбросить, иначе порог бинаризации будет рассчитан не совсем корректно.

Это количество задается в алгоритме параметрически, как значение переменной `back_no`, для большинства изображений это 4 пикселя, однако данный параметр сильно зависит от характера изображения и может варьироваться в зависимости от типа применяемого сканера.

Далее находится начальный критерий для определения порога бинаризации как среднее значение суммы яркостей всего изображение за вычетом суммы яркостей пикселей по краю изображения. Итеративным приближением определяется оптимальный порог `res_thr`. Задаются начальные значения для циклов обхода всех пикселей изображения. Суммируются яркости выше и ниже, определенного ранее начального порога `th`. Кроме того, считается количество пикселей выше и ниже порога. Вычисляется среднее значение двух вычисленных значений максимальной и минимальной яркости. Цикл повторяется пока выполняется условие для `while`. Затем, опять усредняются максимальное и минимальное значения яркости. После останова цикла при условии  $th(k) = th(k-1)$ , выводится `res_th` – оптимальный порог бинаризации. Полученное значение порога нормализуется по всем значениям яркости и вычисляется глобальный порог `por_th`. По этому порогу и проводится бинаризация.

**Результаты работы алгоритмов бинаризации.** На основе разработанного алгоритма была написана компьютерная программа в среде Image Processing Matlab. Также были написаны программы для реализации других известных методов бинаризации (если они не вызывались встроенными в пакет функциями). На рисунке 3 представлены изображения одного и того же отпечатка, бинаризованные методом Оцу и итерационным алгоритмом.

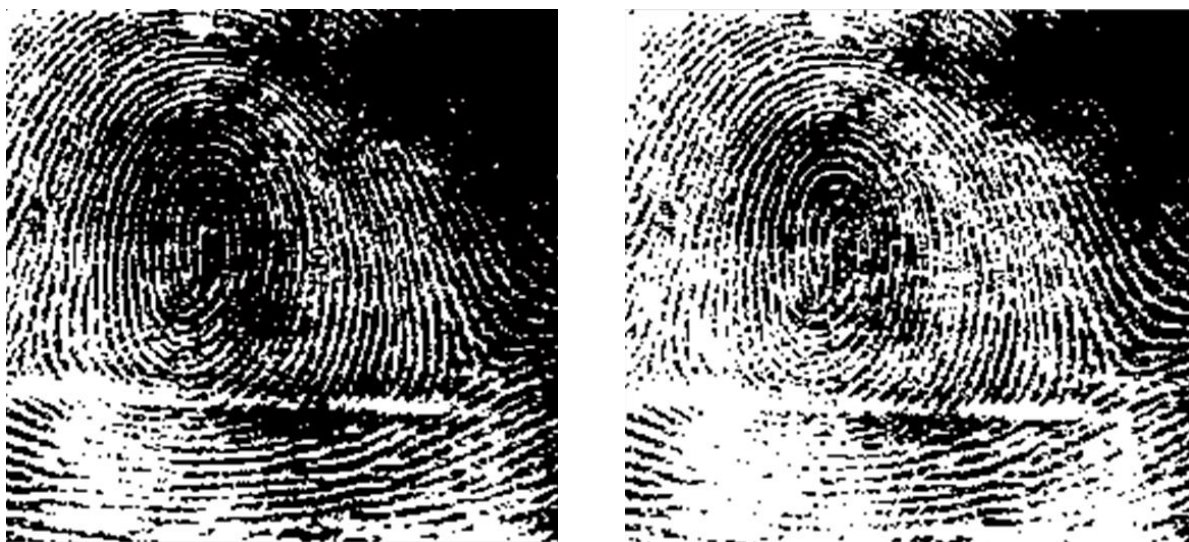


Рис. 3. Слева – результат бинаризации методом Оцу, справа- итерационным алгоритмом.

Видно, что итерационный алгоритм не хуже алгоритма Оцу справился с задачей, изображение получилось даже более четким, значит глобальный порог бинаризации

рассчитан точнее. Для сравнения на рисунках 4 и 5 представлены результаты бинаризации некоторыми другими упомянутыми в статье алгоритмами.

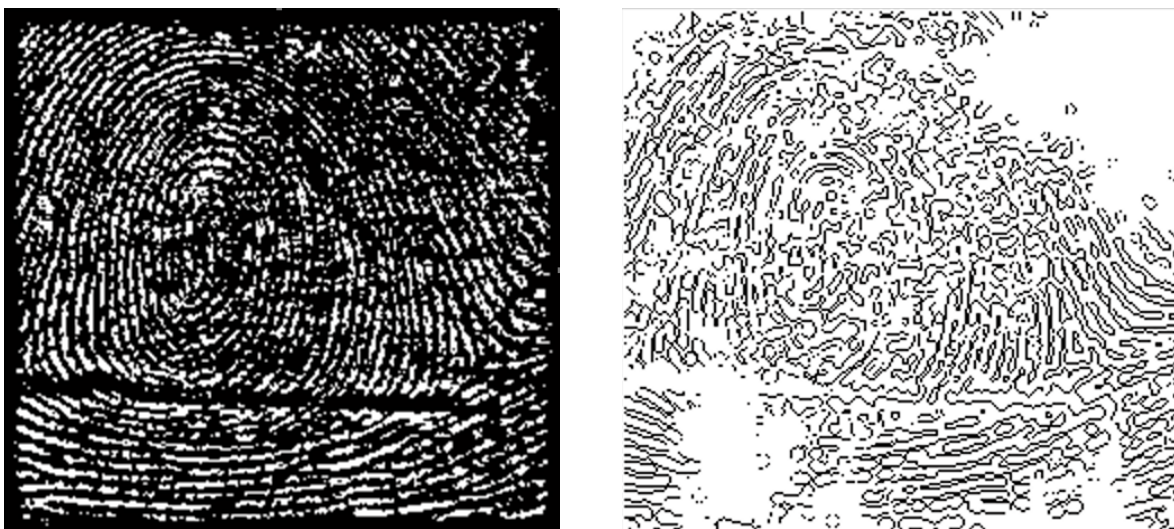


Рис. 4. Слева – результат бинаризации методом Ниблэйка, справа- методом Собеля

Метод Ниблейка дает сильный краевой эффект и заниженный порог бинаризации, из-за которого изображение значительно затемнено, однако восстанавливает папиллярный рисунок в правой верхней области. Метод Собеля выделяет края, теряются мелкие детали в обширных светлых областях. Бинаризация методом Канни также выделяет края, однако общая картина папиллярных линий утрачивается. Самые плохие результаты дал метод Первитта, видно, что порог бинаризации смещен вверх и большая часть мелких деталей утеряна.

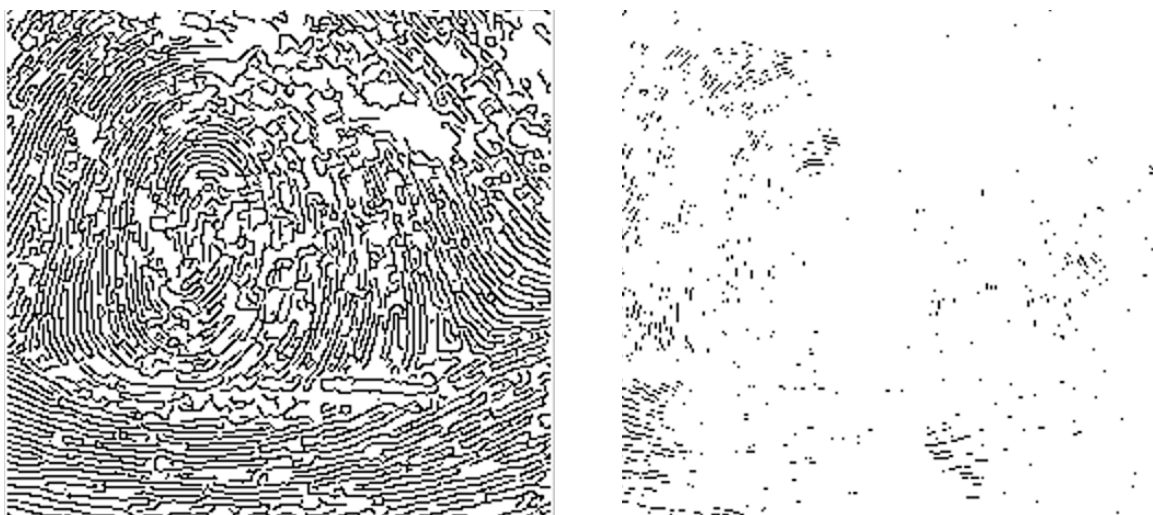


Рис. 5. Слева – результат бинаризации методом Канни, справа- методом Первитта

Бинаризация методами Эйквила и Бернсена дала еще худшие результаты. Можно сделать вывод, что при бинаризации изображений отпечатков пальцев, полученных со сканера, предпочтительнее применять методы поиска глобального порога, чем адаптивные методы.

**Выводы.** В работе решена задача преобразования изображений отпечатков пальцев, представленных в градациях серого, в черно-белый формат, удобный для дальнейшей обработки. Применение итерационного метода бинаризации с краевой обработкой позволяет получить хорошие результаты при обработке изображений отпечатков, полученных со сканера Microsoft 1033. В качестве альтернативны, рассматривались методы Оцу, Эйквилья, Ниблэйка, Бернсена, Собеля, Канны, Первитта. Показано, что наилучшие результаты дает предложенный в работе метод. Перспективы дальнейших исследований состоят в разработке способов скелетизации, выделения признаков и распознавания изображений отпечатков пальцев и реализации на их основе полномасштабной системы обработки и распознавания растровых изображений отпечатков пальцев для дальнейшего использования в биометрических системах доступа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы классификационного экспресс-анализа дактилоскопических изображений для верификационных систем / А.А. Коляда [и др.] // Электроника – 2013. – № 4. – С. 38- 40.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде Matlab / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – Москва : Техносфера, 2006. – 616 с.
3. Sauvola J. Adaptive Document Binarization / J. Sauvola, M. Pietikainen // Pattern Recognition. – 2000. – № 33. – Р. 225–236.
4. Гудков В. Ю. Методы первой и второй обработки дактилоскопических изображений : монография. – Миасс : Геотур, 2009. – 237 с.
5. Форсайт Д. Машинные методы математических вычислений / Д. Форсайт, М. Малькольм, К. Моулер ; пер. с англ. Х. Д. Икрамова. – Москва : Мир, 2008. – 279 с.

*Поступила в редакцию 17.10.2018 г.*

#### ITERATIVE ALGORITHM FOR THRESHOLD BINARIZATION FOR TREATMENT OF FINGER PRINTS IN BIOMETRIC ACCESS SYSTEMS

*M.V. Babicheva, A.S. Yurchenko*

In this paper the method of iterative threshold binarization of fingerprint images is proposed. The specific features of fingerprint images and their influence on the result of binarization using well-known universal methods are analyzed. The basis of the proposed method is an iterative algorithm with edge processing of images, which allows automating the the binarization threshold search. The paper presents an algorithmic description of the method, its comparison with the known binarization methods, the results of application on real images.

**Keywords:** raster image, binarization, fingerprints, binarization threshold, brightness, shade of gray.

**Бабичева Маргарита Вадимовна**

ст. преподаватель кафедры радиопластики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, 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.

**Юрченко Артем Сергеевич**

студент кафедры радиопластики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, Донецк.  
E-mail: 1994artoum@mail.ru

**Yurchenko Artyom**

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



УДК 004.93'1

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ДЕФЕКТОВ В АУДИОФАЙЛАХ

© 2018 *М.В. Мартынов, Т.В. Шарий*

---

В статье предлагается метод автоматического обнаружения звуковых дефектов в аудиосигналах, опирающийся на эффективные модели машинного обучения. Описана общая схема и алгоритм расчета вектора признаков звукового фрейма на основе амплитудно-временного, спектрального и кепстрального анализа сигнала. Приведены результаты экспериментов по детектированию аудиодефектов в музыкальных файлах с помощью многослойного перцептрона и деревьев решений.

*Ключевые слова:* звуковой дефект; глитч; спектральные признаки; MFCC; машинное обучение.

---

**Введение.** В последнее время наблюдается тенденция к увеличению объемов аудиокolleкций в цифровом виде как для личного пользования, так и других всевозможных целей, благодаря таким форматам звука, как MP3, FLAC и OGG [1]. На сегодняшний день самым главным источником пополнения музыкальной фонотеки для большинства пользователей является интернет, где можно легко найти предпочтительный контент и загрузить его из множества ресурсов. Тем не менее, качество звука в некоторых случаях может оказаться недопустимо низким для слушателя. Звук может иметь искажения, такие как: глитч-эффекты [2], скачки, плохое выравнивание (эквализация), клиппирование, шум, неполнота, растяжение / сжатие во времени [3]. Аудиоданные могут быть заявлены как оригинальные, однако в действительности являться восстановленными после сжатия с потерями. Кроме того, при копировании данных с компакт-дисков не исключены ошибки чтения из-за механических проблем привода или некачественной поверхности диска. Динамический диапазон закодированных треков также может варьироваться в значительных пределах, что в конечном итоге повлияет на качество итогового файла.

Важную роль играют и представляют интерес системы цифрового восстановления аудиоматериалов, накопленных в большом количестве к текущему времени за эпоху кассет и VHS-видео, а также звука с виниловых пластинок, несмотря на заметную тенденцию возвращения меломанов к данному виду звуковых носителей и проигрывателей.

Таким образом, становится весьма актуальной задача автоматического обнаружения перечисленных аудиодефектов. Дальнейшие действия уже могут изменяться, в зависимости от ситуации: удаление некачественного аудиоматериала либо попытка исправления дефекта. Проблемы такого рода на протяжении многих лет успешно решались с помощью методов цифровой обработки сигналов [4,5], а в последнее время к ним подключаются мощные современные модели машинного обучения [6-9], что позволяет достигать значительных результатов.

**Постановка задачи.** Целью работы является повышение качества автоматического обнаружения звуковых дефектов в аудиофайле. В статье не рассматриваются дальнейшие действия по удалению дефектов или отбраковке некачественного аудиоматериала. Информационная технология обнаружения аудиодефектов должна поддерживать процессы загрузки и визуализации звуковых файлов, фильтрации, параметризации и аугментации звукового сигнала, сохранения

параметров в файл, обучения классификаторов на основе вычисленных параметров, визуализации результатов обучения и распознавания.

**Общая схема автоматического обнаружения аудиодефектов.** Любой звуковой дефект является результатом повреждения источника аудиоданных. Это произвольное искажение сигнала, возникающее по причине ошибок при выполнении одной из следующих процедур: 1) оцифровка (характерный шум виниловой пластинки, поврежденный винил, ошибки CD-проигрывателя, царапины на компакт-диске, износ пленки кассеты); 2) кодирование / декодирование (ошибки в алгоритмах кодирования); 3) сведение (мастеринг) (низкое качество используемого оборудования, ошибки стереомикширования); 4) запись в плохих условиях (шумная окружающая обстановка, дефекты оборудования); 5) сжатие в более экономный формат, например, MP3; 6) цифровая фильтрация (нежелательное подавление или поднятие определенных частот).

Одним из наиболее распространенных аудиодефектов является т.н. глитч. Обнаружение глитча в сигнале сводится к оконному анализу сигнала и в каждом окне к задаче бинарной классификации «Есть дефект / нет дефекта».

Общая схема работы системы автоматического обнаружения звуковых дефектов в аудиофайлах, изображенная на рис.1, представляет собой классический двухуровневый вариант решения задачи машинного обучения вида «расчет признаков – обучение и распознавание на основе признаков».

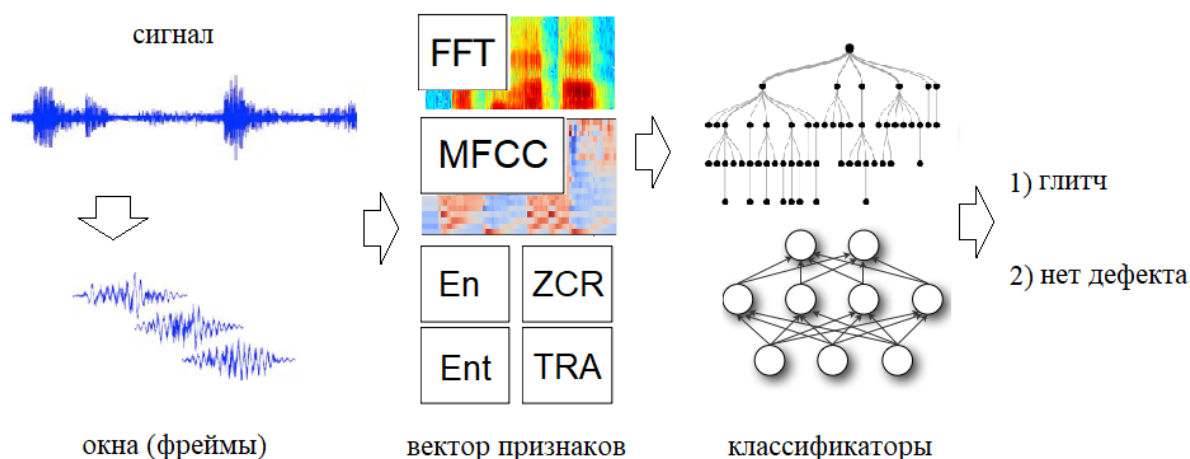


Рис. 1 Общая схема обнаружения звуковых дефектов в аудиофайле

Несмотря на то что, на втором этапе применяются модели глубокого обучения, в статье вопросу инженерии признаков (их извлечению и отбору) уделяется главное внимание. Предполагается, что в конкретном аудиофрагменте присутствует не более одного звукового дефекта. Процедура извлечения всех релевантных признаков звука производится в окнах длительности 100 мс с перекрытием 25 мс, в которых каждый взвешенный оконной функцией Хемминга фрейм становится источником вектора признаков. На основе урвнеграммы аудиосигнала вычисляется ряд полезных амплитудно-временных характеристик звука, которые добавляются в вектор признаков, наряду со своими статистиками, описываемыми в следующем подразделе работы. На основе спектра Фурье также рассчитывается ряд характеристик, входящих в вектор признаков аудиофрагмента. Также на основе спектра сигнала производятся дальнейшие действия для мел-частотного кепстрального анализа с последующим включением кепстральных статистик в вектор признаков. Данными векторами оперируют

статистические модели-классификаторы на этапе распознавания звуковых дефектов и на этапе обучения: нейронные сети и деревья принятия решений. Они сначала обучаются на большом наборе данных (подбирают веса на основе всех векторов признаков из обучающей выборки аудиодефектов), после чего применяются для вычисления типа аудиодефекта (или его отсутствия) в текущем аудиофрагменте. Для хранения всех вспомогательных и промежуточных данных используются csv-файлы.

Музыкальный 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 PCM (импульсно-кодовая модуляция (Pulse Code Modulation)). Все сигналы приводятся к единой частоте дискретизации, равной 44,1 кГц; количество бит на отсчет – ко значению 16.

**Параметризация звукового сигнала.** Вектор признаков аудиосигнала включает 15 амплитудно-временных характеристик, 9 спектральных дескрипторов и 12 мел-частотных кепстральных коэффициентов.

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) маркеры онсетов (начала и окончания звучания фрагмента); 6) различные статистики вышеуказанных параметров (среднее, дисперсия, стандартное отклонение, медиана, мода и т.д.).

Энергия участка аудиосигнала рассчитывается во временной области сигнала по простой формуле:

$$E(k, L) = \frac{1}{L} \sum_{i=k}^{k+L-1} x_i^2,$$

где (и в дальнейших формулах)  $k$  – позиция начального отсчета участка;  $L$  – число отсчетов на анализируемом участке;  $x_i$  – значение  $i$ -го отсчета сигнала.

Энтропия участка аудиосигнала рассчитывается на основе равномерно распределенных бинов всех значений отсчетов сигнала по формуле:

$$H(k, L) = - \sum_{i=1}^{nbins} P_i(x_k) \log_2 P_i(x_k),$$

где  $nbins$  – количество бинов распределения;  $P_i(x_k)$  – вероятность принадлежности отсчета  $x_k$   $i$ -ому бину.

Еще одним параметром речевого сигнала, который рассчитывается в статье на основе амплитуд его отсчетов, является частота перехода уровня сигнала через ноль (Zero Crossings Rate, ZCR) [5]. Эта характеристика вычисляется по формуле:

$$ZCR(k, L) = \frac{1}{L} \sum_{i=k}^{k+L-1} \frac{|sign(x_{i+1}) - sign(x_i)|}{2},$$

Признак «Сумма абсолютных изменений» (ASC, Absolute Sum of Changes) [10] вычисляется по формуле:

$$ASC(k, L) = \sum_{i=k+1}^{k+L-1} |x_i - x_{i-1}|. \quad (1)$$

Индекс сложности аудиофрагмента (CE, Complexity Estimate) – оценка сложности временного ряда; более «сложные» ряды характеризуются большим количеством пиков, провалов и т.д. Данный признак вычисляется по формуле:

$$CE(k, L) = \sum_{i=k+1}^{k+L-1} (x_i - x_{i-1})^2. \quad (2)$$

Признак «Асимметрия временного обращения» (TRA, Time Reversal Asymmetry) вычисляется по формуле:

$$TRA = E[L^2(X)^2 \cdot L(X) - L(X) \cdot X^2], \quad (3)$$

где  $L(X)$  – оператор задержки, введенный в [15],  $E$  – математическое ожидание. Формулу (3) можно развернуть в более подходящем для расчетов виде:

$$TRA = \frac{1}{L - 2lag} \sum_{i=0}^{L-2lag} x_{i+2lag}^2 \cdot x_{i+lag} - x_{i+lag} \cdot x_i^2,$$

где  $lag$  – значение задержки (количество семплов задержки);  $L$  – число отсчетов на анализируемом участке.

Помимо перечисленных характеристик, интерес представляют такие статистики, как: медиана, среднее, количество пиков, положение первого и последнего пиков, количество провалов, положение первого и последнего провалов. Данные параметры также включаются в вектор признаков.

Далее вектор признаков расширяется *спектральными параметрами*, которые вычисляются на основе спектра Фурье фрейма.

Спектральная равномерность (SFM, Spectral Flatness Measure) характеризует степень тональности или шумности сигнала в данном частотном диапазоне:

$$SFM = \frac{h-l+1 \sqrt{\prod_{m=l}^h |f(m)|^2}}{\frac{1}{h-l+1} \sum_{m=l}^h |f(m)|^2}. \quad (4)$$

В формуле (4) и дальнейших формулах применяются следующие обозначения:  $l$  – левая (нижняя) граница анализируемого частотного диапазона спектра текущего фрейма (окна анализа) сигнала;  $h$  – правая (верхняя) граница анализируемого частотного диапазона спектра фрейма сигнала;  $f(m)$  – зависимость амплитуды от частоты (амплитудный спектр).

*Спектральный центроид* (SC, Spectral Centroid) определяет центр масс и выражает степень «яркости» звучания сигнала:

$$SC = \frac{\sum_{m=l}^h m |f(m)|^2}{\sum_{m=l}^h |f(m)|^2} .$$

Спектральная энтропия сигнала (SE, Spectral Entropy) вычисляется по формуле:

$$SE = \sum_{m=l}^h |f(m)| \log_2 |f(m)| .$$

Частота спада спектральной энергии (Spectral Roll-off) – это частота  $Rf$ , ниже которой содержится 85% ( $\beta=0.85$ ) суммарной энергии спектра:

$$\sum_{m=1}^{Rf} |f(m)| = \beta \cdot \sum_{m=1}^{fs/2} |f(m)| ,$$

где  $fs$  – частота дискретизации аудиосигнала.

*Кепстральные параметры* фрейма рассчитываются по алгоритму MFCC (Mel-frequency cepstral coefficients, мел-частотные кепстральные коэффициенты) [4]. 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 20 перекрывающихся фильтров психоакустической шкалы мел в диапазоне частот от 100 Гц до 4000 Гц (каждый фильтр имеет частотную характеристику треугольной формы). В третьем блоке выполняется логарифмирование измененного спектра, после чего, в финальном блоке, производится дискретное косинусное преобразование второго типа.

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

**Описание эксперимента и анализ результатов.** Т.к. в работе для решения задачи автоматического обнаружения звуковых дефектов применяются статистические классификаторы, то качеству набора обучающих и тестовых данных уделяется особое внимание. Музыкальные файлы для экспериментов выкачиваются из архива FreeMusicArchive (FMA) [11]. Можно также использовать персональную коллекцию музыки, однако данные FMA лучше сбалансированы по жанрам и звуковой структуре. Совокупное время звучания наименьшего набора файлов составляет 66 часов 40 минут.

Самые важные данные содержатся в наборе непосредственно звуковых дефектов, который выкачивается с сайта freesound.org. В корпусе содержатся 39 глитч-дефектов. Уровнеграммы и спектрограммы части из них проиллюстрированы на рис.2.

В качестве базовых классификаторов выбраны многослойный перцептрон и деревья принятия решений. Перцептрон содержит 3 слоя, включая 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 перцептрон используется для классификации «Есть дефект / нет дефекта», в качестве функции потерь применяется бинарная кросс-энтропия. Оптимизация значений весов при обучении нейронной сети производится по адаптивному алгоритму RMSProp [7,8].

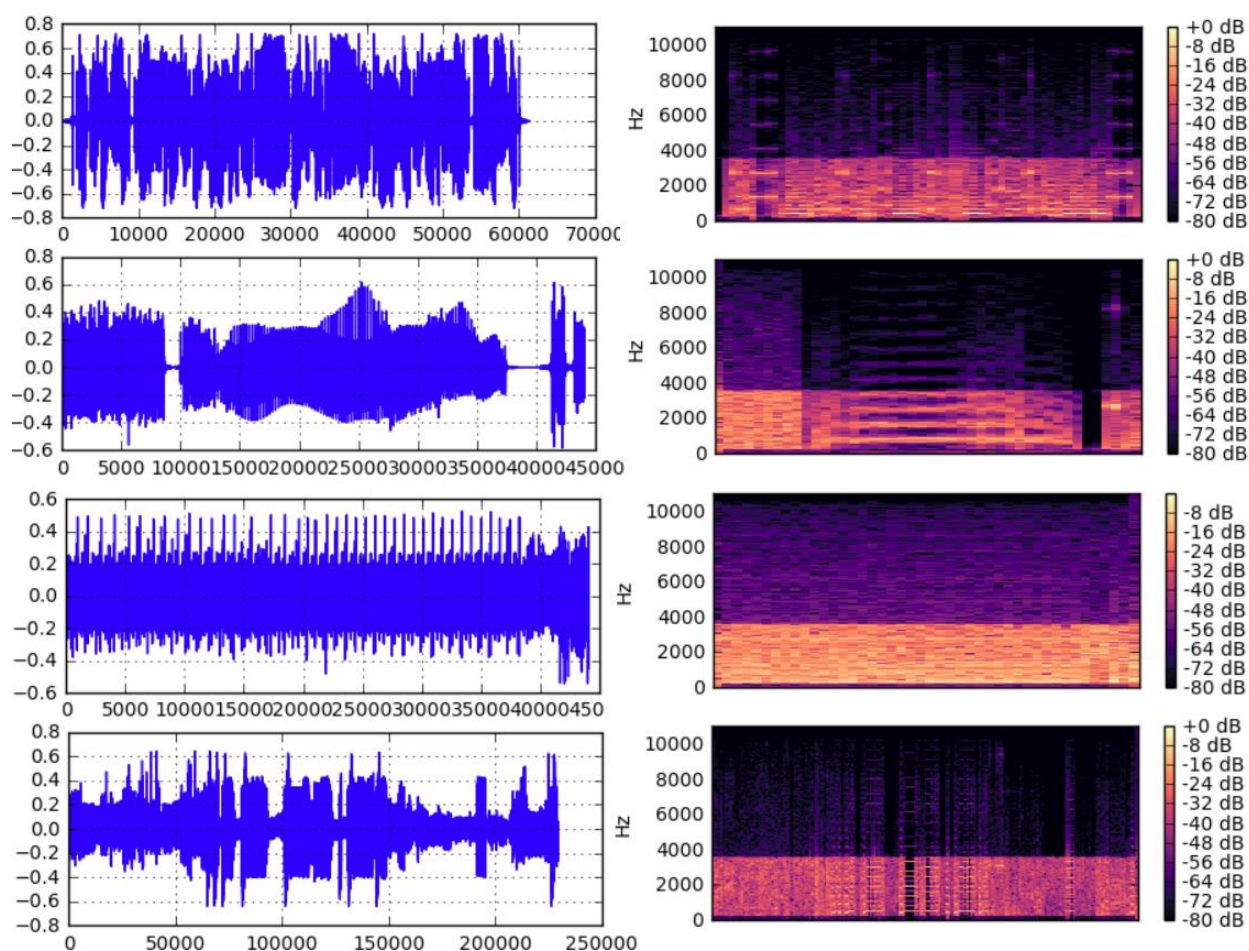


Рисунок 2 – Примеры уровнеграмм и спектрограмм глитч-дефектов из репозитория dotY21 (freesound.org)

Эксперимент проводился по следующей методологии: 1) производилась аугментация данных и наложение каждого из обучающих глитч-эффектов в произвольных участках музыкальных сигналов; 2) в каждом из аудиосигналов выбирались по 5 произвольных участков и 5 искаженных, с сохранением позиций и меток; 3) в этих отобранных фрагментах, а также, частично, в сформированных пользователем фрагментах (в особо важных с точки зрения аудиоэксперта местах), вычислялись все необходимые амплитудно-временные, спектральные, кепстральные параметры для формирования вектора признаков; 4) формировались векторы признаков и сохранялись в csv-файле с метками «дефект» и «нет дефекта». В итоге получилось 9600 36-мерных записей (векторов признаков); 5) производилось обучение многослойного персептрона и дерева принятия решений с помощью скрипта `audioml.py`; 6) тестировались обученные модели на тестовой выборке, а также распознавались аудиодефекты во всем музыкальном сигнале с помощью скрипта `recognize_defects.py`.

Статистический анализ собранных данных показал, что часть признаков (коэффициентов) сильно коррелирует друг с другом. Также, как продемонстрировали первые эксперименты, данные в исходном виде вызвали большие трудности у классификаторов: точность распознавания деревьев принятия решений составляла

около 78-80% на тестовой выборке, в то время как многослойный перцептрон даже на обучающей выборке не мог превысить базовый порог 50%.

В таблице 1 приведен список самых релевантных признаков, полученных в результате обучения ансамбля деревьев принятия решений на исходных 36-мерных векторах, отранжированных в порядке убывания их степени значимости.

Таблица 1 – Наиболее значимые дескрипторы аудиофрайма

Название дескриптора	Степень значимости
Сумма абсолютных изменений	0.192
Индекс сложности фрейма	0.153
Второй коэффициент MFCC	0.062
Третий коэффициент MFCC	0.057
Спектральный центроид	0.055
Шестой коэффициент MFCC	0.053

С учетом результатов разведочного анализа, данные подверглись дополнительной предварительной обработке: 1) нормализация к стандартному распределению (вычитание среднего и деление на стандартное отклонение); 2) сокращение размерности признакового пространства до 26 признаков с помощью анализа главных компонент (PCA, Principal component analysis). После обработки входных данных дерево принятия решений показало точность при кросс-валидации 80% ( $\pm 2\%$ ); ансамблирование деревьев позволило повысить точность распознавания глитчей до 85%; многослойный перцептрон на 60 эпохах показал, в среднем, точность 97% на обучающей и 91% на валидационных выборках (рис.3).

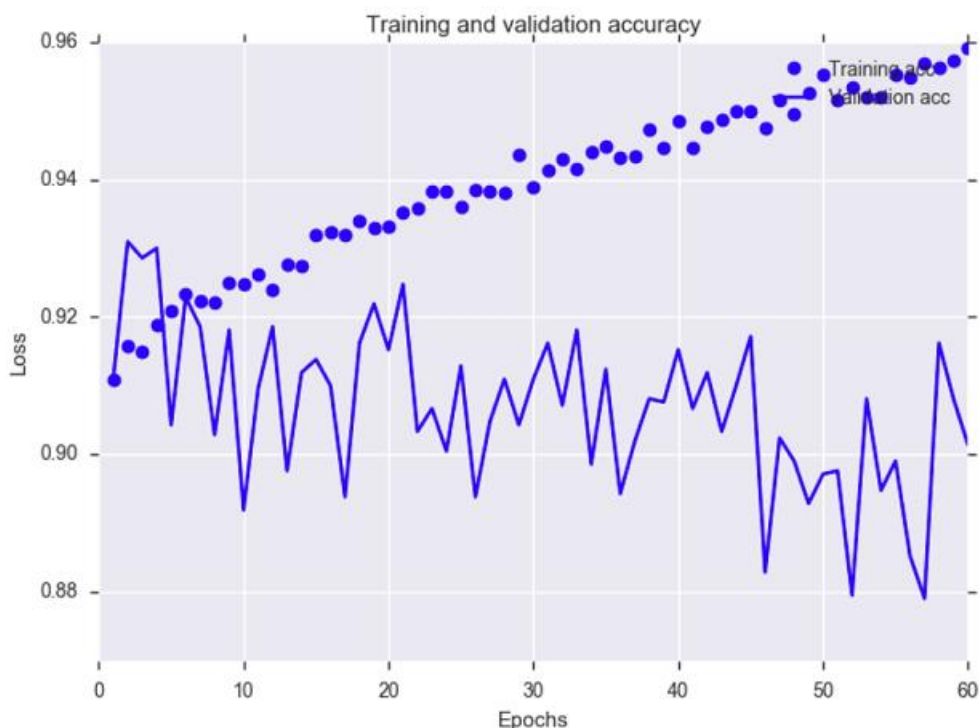


Рис. 3 Показатели работы многослойного перцептрона

Этому результату можно доверять с дополнительными оговорками: размер выборки (как музыки, так и глитчей) был недостаточно велик для полноценного анализа эффективности моделей. Тем не менее, показатели свидетельствуют о том, что предложенный в статье подход перспективен.

Эксперименты производились на компьютере со следующими характеристиками: процессор Intel Core i3 с тактовой частотой 3,5 ГГц; объем оперативной памяти 16 Гб. Скорость расчета векторов признаков равна, в среднем, 85х (85 секунд сигнала обрабатываются за 1 секунду), что дает возможность использовать систему в реальном времени.

**Выводы.** Проведенные исследования продемонстрировали обоснованность и перспективность подхода к автоматическому обнаружению аудиодефектов в звуковых файлах на основе совместного использования амплитудно-временных, спектральных и кепстральных параметров сигнала. На относительно небольшой обучающей выборке музыкальных сигналов и глитчей с использованием простейших классификаторов машинного обучения получена точность бинарной классификации «дефект / не дефект» на отметке 91%. Корреляционный анализ значений признаков дал практические основания для сокращения размерности исходного признакового пространства, а анализ структуры дерева принятия решений показал, что среди всех параметров наиболее значимыми для классификации параметрами являются второй, третий и шестой коэффициенты MFCC, а также специальные дескрипторы «сумма абсолютных изменений» и «индекс сложности». Вычислительная сложность предложенного в статье метода относительно невелика и позволяет использовать его в реальном времени. Дальнейшая работа связана с более тщательным подбором и статистическим анализом низкоуровневых признаков сигнала, а также исследованием возможностей применения в задаче обнаружения аудиодефектов моделей глубокого машинного обучения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Топ 10 аудиоформатов – рейтинг и преимущества [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : <https://online-converting.ru/blog/audio-top10>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения : 02.03.2019.
2. Reiss J. Audio Issues in MIR Evaluation / J. Reiss, M. Sandler // Proceedings of the 5th International Conference on Music Information Retrieval ISMIR. – 2004. – P. 28-33.
3. Godsill S. Digital audio restoration / S. Godsill, P. Rayner, O. Cappé // Applications of digital signal processing to audio and acoustics. – 2006. – P. 133-194.
4. Tralie C. Early MFCC and HPCP Fusion for Robust Cover Song Identification / C. Tralie // Proceedings of the 18th ISMIR Conference, Suzhou, China. – 2017. – P. 294-301.
5. Peeters G. A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project [Электронный ресурс] / G. Peeters // CUIDADO Proj. Report. – 2004. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : [http://recherche.ircam.fr/anasyn/peeters/ARTICLES/Peeters\\_2003\\_cuidadoaudiofeatures.pdf](http://recherche.ircam.fr/anasyn/peeters/ARTICLES/Peeters_2003_cuidadoaudiofeatures.pdf), свободный. – Загл с экрана. – Дата обращения : 02.03.2019.
6. Choi K. A Tutorial on Deep Learning for Music Information Retrieval [Электронный ресурс] / K. Choi. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : <https://arxiv.org/pdf/1709.04396v2.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения : 02.03.2019.
7. Николенко С. Глубокое обучение / С. Николенко, А. Кадурин, Е. Архангельская. – Санкт-Петербург : Питер, 2018. – 480 с.
8. Рашка С. Python и машинное обучение / С. Рашка. – Москва : Пресс, 2017. – 418 с.
9. Хайкин С. Нейронные сети : полный курс / С. Хайкин. – Москва : Вильямс, 2016. – 1104 с.
10. Fulcher B. D. Highly Comparative Feature-based Time-series Classification / B. D. Fulcher, N. Jones // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2014. – Vol. 26. – P. 3026-3037.
11. FMA: A Dataset for Audio Analysis / M. Defferrard [et al.] // Proceedings of the 18th ISMIR Conference, Suzhou, China. – 2017. – P. 316-323.

*Поступила в редакцию 19.10.2018 г.*



AUTOMATIC DETECTION OF SOUND DEFECTS IN AUDIO FILES

*M.V. Martynov, T.V. Sharii*

The article presents novel method for automatic detection of sound defects in audio signals relying on efficient machine learning models. The description is given of a general scheme and an algorithm for evaluating the features of a sound frame based on time-domain, spectral and cepstral analysis of signal. The results of experiments on audio defects detection in music files are given. In experiments multi-layer perceptrons and decision trees were used.

**Keywords:** sound defect; glitch; spectral features; MFCC; machine learning.

**Мартынов Максим Витальевич**

студент кафедры компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.

**Martynov Maksim Vitalyievich**

Student at Department of Computer Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

**Шарий Тимофей Вячеславович**

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

**Sharii Timofei Viacheslavovich**

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

## ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 532.526:536.24.08

### СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕН В ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКАХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ-АКТИВНЫХ ПОЛИМЕРОВ И ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

© 2018 А.П. Симоненко, П.В. Асланов, Н.А. Дмитренко, Т.К. Гучмазова

Снижение гидродинамического сопротивления турбулентного трения (ГСТТ) жидкостей добавками высокомолекулярных полимеров (ВП) и мицеллообразующих поверхностно-активных веществ (МПАВ) имеет перспективы широкого практического применения. Кроме этого, изучение физической природы эффекта снижения ГСТТ приводит к лучшему пониманию основных закономерностей пристенных турбулентных течений.

В представленной статье, на основе имеющихся публикаций, систематизированы основные закономерности влияния гидродинамически-активных добавок (ГДАД) на сопротивление трения и теплообмен в турбулентных потоках жидкостей и разработаны рекомендации по гидродинамическому проектированию теплообменных аппаратов централизованных систем подачи тепла и холода.

**Ключевые слова:** турбулентность, сопротивление трения, гидродинамически-активные добавки, полиакриламид, метаупон, теплообмен, основные закономерности, гидродинамическое проектирование, теплообменные аппараты.

**Состояние проблемы.** При гидродинамическом проектировании теплообменных аппаратов различного назначения (кожухотрубных теплообменников, воздухоохладителей, радиаторов для отвода тепла от двигателей большой мощности и т.д.) необходимо учитывать основные закономерности процессов теплопередачи, которые в достаточной мере изложены в работах [1-4].

Важным резервом повышения эффективности работы централизованных систем подачи тепла и холода может быть использование явления снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения (ГСТТ) тепло- и хладоносителей в напорных трубопроводах. Однако, введение в турбулентные потоки жидкостей добавок высокомолекулярных полимеров (ВП) и мицеллообразующих поверхностно-активных веществ (МПАВ) не только приводит к существенному снижению гидродинамического сопротивления трения, но и к уменьшению интенсивности турбулентного тепло- и массопереноса. В связи с этим возникает необходимость исследования влияния гидродинамически-активных добавок на процессы переноса тепла и холода в теплообменниках аппаратах.

**Турбулентный теплообмен в растворах полимеров и МПАВ.** В работах [5-16] приведены результаты экспериментальных исследований по определению коэффициента теплоотдачи при течении растворов высокомолекулярного полиакриламида (ПАА) в круглой трубе, а также данные по профилям температуры в канале прямоугольного сечения для потоков с добавками ПАА и МПАВ - промышленной пасты «метаупон».

Опыты по определению коэффициента теплоотдачи [10] проводились на теплообменнике типа «труба в трубе» при различных концентрациях ПАА и двух числах Рейнольдса  $Re = 1,43 \cdot 10^4$  и  $1,77 \cdot 10^4$ . Установлено, что с ростом концентрации ПАА в интервале  $C = (0 \div 3) \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup> происходит снижение коэффициента теплоотдачи.

При этом большому значению числа  $Re$  соответствует более значительное уменьшение турбулентного теплообмена.

Эксперименты по измерению профилей температуры проводились в канале прямоугольного сечения  $50 \times 20$  мм. На расстоянии 2 м от входа ( $\approx 70$  калибров) размещался рабочий участок длиной 1,2 м, боковые стенки которого были изготовлены из органического стекла, а верхняя и нижняя – из нержавеющей стали. Через верхнюю и нижнюю стенки пропускался переменный ток силой от 40 до 140 ампер, что обеспечивало подвод тепла к жидкости. В конце рабочего участка проводили измерения профилей температуры [10, 11].

Температура жидкости измерялась с помощью хромель-алюмелевой термопары с диаметром термоэлектродов 0,09 мм, которая перемещалась по сечению потока. Средние значения термоэлектродвижущей силы определяли потенциометром УПИП – 60М. Для измерения температуры стенки в верхнюю и нижнюю части рабочего участка были впаяны по три термопары.

На рис. 1 и 2, в безразмерных координатах, приведены профили температуры в растворах ПАА и «метаупона», содержащего дополнительно в качестве способствующего мицеллообразованию вещества 2%, вес. хлористого магния. По оси ординат отложена безразмерная температура  $\Theta^+ = (T_w - T) \rho C_p U^* / q_w$ , где  $t_w$  – температура стенки,  $t$  – температура жидкости в потоке,  $\rho$ ,  $C_p$  – плотность и удельная теплоемкость исследуемой жидкости,  $U^*$  – динамическая скорость рассчитанная по напряжению трения на стенке и плотности жидкости,  $q_w$  – тепловой поток через стенку канала. По оси абсцисс отложена безразмерная координата  $y^+ = U^* y / \nu$  которая рассчитывалась по вязкости растворов гидродинамически-активных веществ.

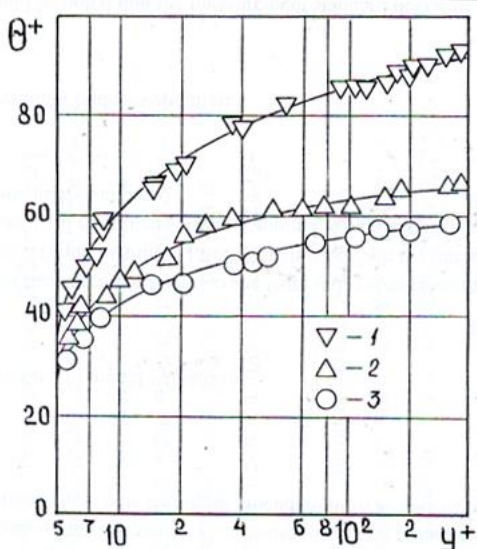


Рис. 1 Профили температуры в водных растворах полиакриламида (1,2) и в воде (3). 1,2 – концентрация ПАА  $C_{ПАА} = 0,01$  и  $0,005\%$ , вес., соответственно. Данные работы [11]

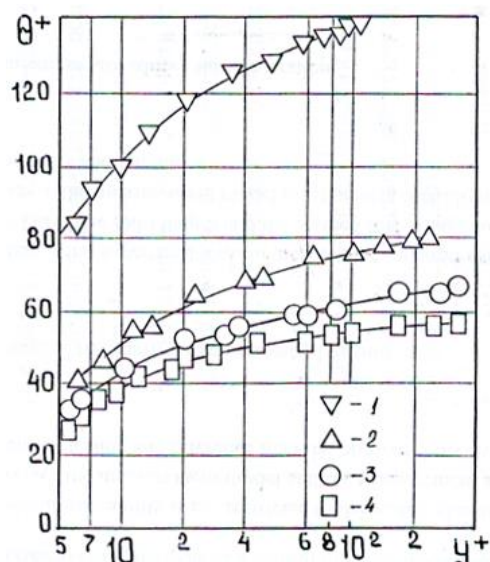


Рис. 2. Профили температуры в водных растворах метаупона (1,2,3) и в воде (4). 1,2,3 – концентрация метаупона  $C_{МУ} = 0,4$ ; 0,2; 0,3% вес., соответственно. Содержание хлористого магния в растворах  $C_{MgCl_2} 2\%$ , вес. Данные работы [11]

Из рис. 1 и 2 видно, что профили температур в потоках с гидродинамически-активными добавками располагаются выше по сравнению с профилем для воды. При этом прямолинейный участок в профиле температур для растворов ПАА и «метаупона»

смещен в сторону больших значений координаты  $y^+$ . Полученные опытные данные свидетельствуют о том, что в течениях с гидродинамически-активными добавками происходит перераспределение термического сопротивления между отдельными областями турбулентного потока. В частности, это перераспределение сопровождается возрастанием термического сопротивления пристенной области, включающей вязкий подслой и переходную зону. Отметим, что полученные данные согласуются с результатами измерений профилей температуры в растворах ПАА, которые приведены в работах [12, 16, 17].

Авторы работ [10-17] делают вывод, что воздействие добавок ПАВ и полимеров на пристенную турбулентность приводит не только к снижению гидродинамического сопротивления трения, но и к значительному уменьшению турбулентного теплообмена.

Особый интерес представляют результаты исследований, которые приведены в работах [6, 9, 14, 15].

Авторы этих работ утверждают, что при числах Прандля  $Pr > 1$  гидродинамически-активные добавки оказывают большое влияние на снижение уровня тепло- и массопереноса, чем на уменьшение турбулентного трения. При этом отмечается, что для случаев, когда  $Pr \ll 1$  добавки незначительно снижают уровень теплопереноса.

Влияние шероховатости поверхности на теплообмен проявляется по-разному в зависимости от режима течения и величины числа Прандля [6, 9, 18]. Максимальная интенсификация процесса теплопереноса при  $Pr > 1$  наблюдается в переходном режиме проявления шероховатости. При этом следует отметить, что существует область значений чисел Рейнольдса, в которой влияние шероховатости на теплообмен превосходит ее влияние на турбулентное сопротивление. При числах  $Pr < 1$  шероховатость незначительно повышает скорость теплообмена. При этом величина отношения коэффициентов теплообмена на шероховатой и гладкой поверхностях монотонно увеличивается с ростом числа Рейнольдса.

**Рекомендации по гидродинамическому проектированию теплообменных аппаратов.** Из основных закономерностей снижения ГСТТ добавками высокополимеров [19] и мицеллообразующих поверхностно-активных веществ [20] известно, что на местных сопротивлениях и при обтекании потоком жидкости шероховатых поверхностей величина эффекта снижения значительно меньше, чем в гладких трубах, а при определенных условиях она становится равной нулю.

Конструктивно теплообменные аппараты (ТА) сочетают большое количество местных сопротивлений (колен, поворотов и др.), а также прямолинейных участков труб по которым подаются тепло- и хладоносители. В связи с тем, что внести изменения в конструкции ТА путем видоизменения местных сопротивлений считается нецелесообразным, рассмотрим влияние шероховатости внутренней поверхности труб на величину снижения ГСТТ жидкостей (воды) добавками гидродинамически-активных ВП и МПАВ.

**Коэффициент гидродинамического сопротивления.** При исследовании течений жидкостей одной из наиболее важных является зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления трения  $\lambda$  от числа Рейнольдса:  $\lambda = \lambda(Re)$ . Для растворов ПАВ (как и для растворов полимеров) возможны два подхода при построении графиков зависимостей  $\lambda = \lambda(Re)$ .

Принципиальное отличие этих подходов проявляется при выборе вязкости в числе Рейнольдса, которое обусловлено конкретной задачей исследования. При определении величины действительного (технического) эффекта снижения

сопротивления целесообразно рассматривать зависимость коэффициента  $\lambda$  от чисел Рейнольдса  $Re$ , построенных по вязкости воды. Тогда, при заданном  $Re = const$ , по графику  $\lambda = \lambda(Re)$ , можно рассчитать величину действительного эффекта, которая является наиболее важной характеристикой для технических приложений. Использование при построении зависимости  $\lambda = \lambda(Re)$  чисел Рейнольдса, вычисленных по вязкости растворов ПАВ, оказывается целесообразным при изучении физической природы эффекта. Такое представление опытных данных позволяет, в частности, сделать вывод о сильном ламинаризирующем действии добавок ПАВ на турбулентность. Кроме этого, оно может быть использовано при нахождении предельной асимптоты для максимального снижения сопротивления.

В работах [21-26] были определены зависимости  $\lambda = \lambda(Re)$  для течений водных растворов метаупона и диталана OTS в гладких [21-23] и шероховатых [24-26] трубах.

На рис. 3 представлены опытные данные для растворов диталана OTS. Измерения проведены с применением гладкой трубки диаметром 0,266 см. Числа Рейнольдса рассчитывались по вязкости воды (рис. 3, а) и вязкости раствора (рис. 3, б), которая определялась из зависимости напряжения трения на стенке  $\tau_w$  от градиента скорости.

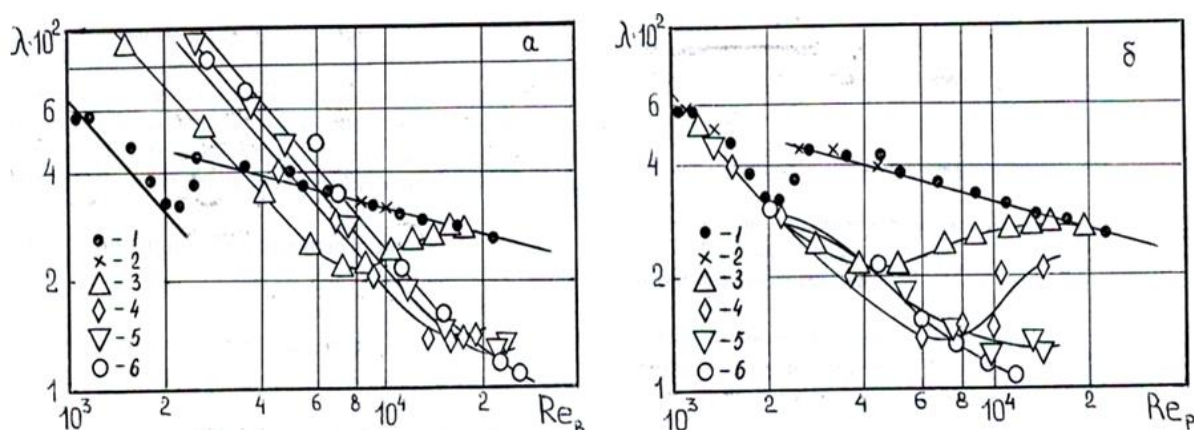


Рис. 3. Зависимость  $\lambda$  от  $Re$ : 1- вода; 2-6 – концентрация диталана OTS -  $C = 0,3; 0,6; 1,2; 1,8$  и  $2,4\%$ , вес., соответственно; концентрация хлористого натрия  $C = 3\%$ , вес.; температура раствора  $T = 18^\circ\text{C}$ . Числа Рейнольдса рассчитаны по вязкости воды (а) и раствора диталана OTS (б) соответственно. Данные работы [22]

Из приведенных зависимостей  $\lambda = \lambda(Re)$  (рис. 3, а) видно, что в ламинарном режиме движения коэффициент сопротивления растворов диталана OTS значительно больше аналогичной величины для воды. Для каждой из концентраций можно указать некоторое пороговое число Рейнольдса  $Re_{пор}$ , построенное по вязкости воды, выше которого начинает проявляться эффект снижения гидродинамического сопротивления. При этом с увеличением концентрации диталана OTS  $Re_{пор}$  смещается в сторону больших значений. Коэффициент  $\lambda$  достигает минимального значения для заданной концентрации добавки при некотором определенном числе Рейнольдса  $Re_{min}$ . При  $Re > Re_{min}$  сопротивление возрастает, и кривая  $\lambda = \lambda(Re)$  выходит на соответствующую кривую для воды. Этот выход хорошо зафиксирован для раствора с концентрацией диталана OTS  $C = 0,6\%$ , вес.

Аналогичные результаты для растворов метаупона приведены на рис. 4. Возрастание величины  $\lambda$  при  $Re > Re_{min}$  связано с уменьшением влияния добавок ПАВ на турбулентность, что можно объяснить разрушением анизометричных мицелл при больших механических напряжениях в потоке. Следует отметить особенность течений растворов ПАВ, важную в практическом отношении: с ростом концентрации добавки

число  $Re_{min}$ , определяющее минимальное значение коэффициента сопротивления, смещается в сторону больших значений. Следовательно, для расширения скоростной области проявления эффекта необходимо повышать концентрацию ПАВ в растворе.

При использовании чисел Рейнольдса, основанных на вязкости растворов (рис. 3б и 4б), для ламинарного течения растворов диталана OTS и «метаупона» получена такая же зависимость  $\lambda = \lambda(Re)$ , как и для воды. С ростом числа Рейнольдса добавки ПАВ приводят к сильной ламинаризации течения. В этом случае отсутствуют пороговые числа  $Re$ , добавки ПАВ начинают снижать сопротивление сразу же после возникновения турбулентности.

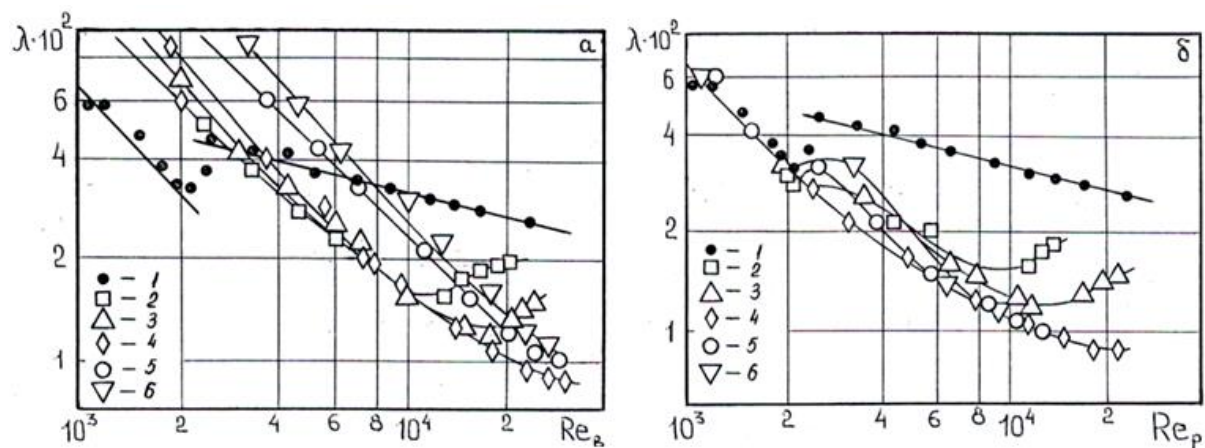


Рис. 4. Зависимость  $\lambda$  от  $Re$ : 1- вода; 2-6 – концентрация метаупона  $C = 0,3; 0,6; 1,2; 2,4$  и  $3,6\%$ , вес., соответственно; концентрация хлористого натрия  $C = 7,4\%$ , вес.; температура раствора  $T = 18^\circ\text{C}$ . Числа Рейнольдса рассчитаны по вязкости воды (а) и раствора метаупона (б) соответственно.

Данные работы [22]

Результаты опытов с водными растворами метаупона в шероховатых трубах [25] приведены на рис. 5, где по оси абсцисс отложено число Рейнольдса, рассчитанное по вязкости растворов ПАВ, а по оси ординат – коэффициент гидродинамического сопротивления  $\lambda$ . Как и при течении растворов в гладких трубах, можно для каждой из концентраций ПАВ выделить число Рейнольдса  $Re_{min}$ , при котором снижении сопротивления достигает максимального значения. С увеличением концентрации  $Re_{min}$  смещается в сторону больших значений. Кроме этого, его величина зависит от шероховатости поверхности – при неизменной концентрации ПАВ большему значению эквивалентной шероховатости  $K_s$  соответствует меньшее  $Re_{min}$ . Рассчитанное максимальное снижение сопротивления для трубки с  $K_s = 0,93$  мм достигает 59% при концентрации метаупона 0,6% и  $Re_{min} = 6,5 \cdot 10^3$ , а для трубки с  $K_s = 0,42$  – 66% при той же концентрации и  $Re_{min} = 1,2 \cdot 10^4$ .

В области  $Re > Re_{min}$  происходит более резкое (по сравнению с гладкими трубками) возрастание коэффициента  $\lambda$ . Это свидетельствует о том, что шероховатость поверхности интенсифицирует процесс разрушения анизометричных мицелл.

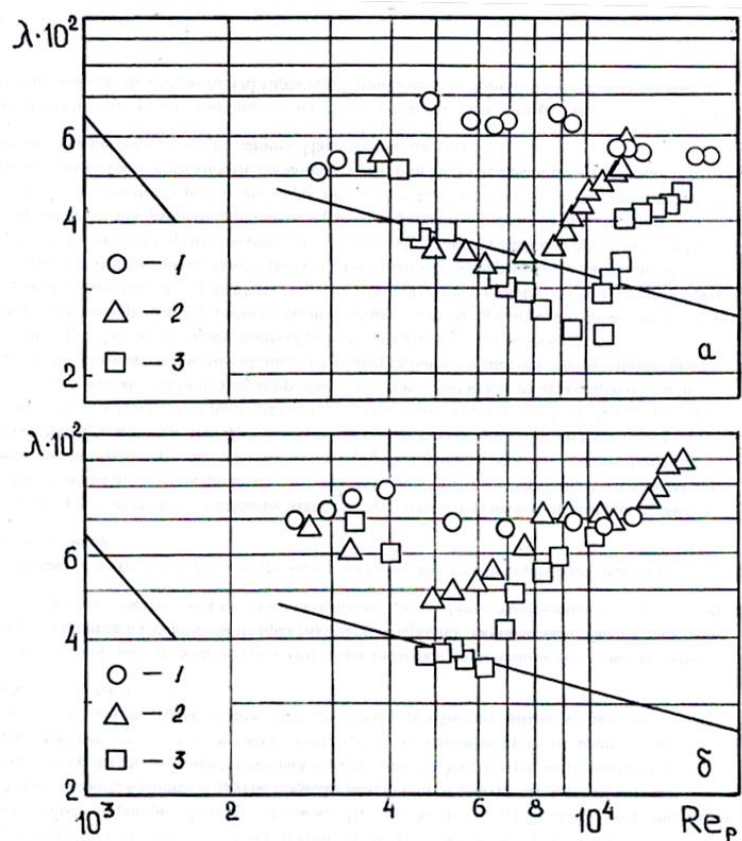


Рис. 5. Зависимость  $\lambda$  от  $Re$  для шероховатой трубы: эквивалентная шероховатость  $a - K_s=0,42$  мм;  $b - K_s=0,93$  мм; 1- вода; 2,3 – концентрация метаупона  $C = 0,35$  и  $0,6\%$ , вес., соответственно; концентрация хлористого натрия  $C=8,8\%$ , вес.; водородный показатель среды  $pH = 10$ ; температура растворов  $T= 15^\circ C$ .  
Данные работы [25]

**Механическая деструкция.** Экспериментальные исследования механической деструкции в растворах ПАВ проводились на специальном гидродинамическом стенде. Охлаждение и подогрев исследуемых растворов осуществляли с помощью теплообменников, через которые пропускался охлажденный рассол из промышленной холодильной машины или подогретая вода. Концентрацию ПАВ в растворе определяли титрованием. Водородный показатель среды  $pH$  контролировали лабораторным  $pH$ -метром « $pH-340$ ».

На рис. 6 представлены результаты опытов для водного раствора диталана OTS концентрации  $C = 2,41\%$ , вес., в виде зависимостей перепадов давления  $\Delta P$  от расхода жидкости  $q$  [22]. Перепады давления измеряли на участках длиной 5 м при удалении  $l = 23$  м и 95 м от выхода из насоса. Видно, что более значительное уменьшение перепада давления наблюдается на расстоянии 95 м от насоса. Это свидетельствует о том, что добавки ПАВ при прохождении через насос частично теряют свою гидродинамическую эффективность (механическая деструкция). При удалении от насоса происходит восстановление раствором свойствами снижать сопротивление. Рассчитанная по перепадам давления величина эффекта составляет 46 и 79% на расстоянии 23 и 95 м от выхода из насоса, соответственно, при  $q = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ .

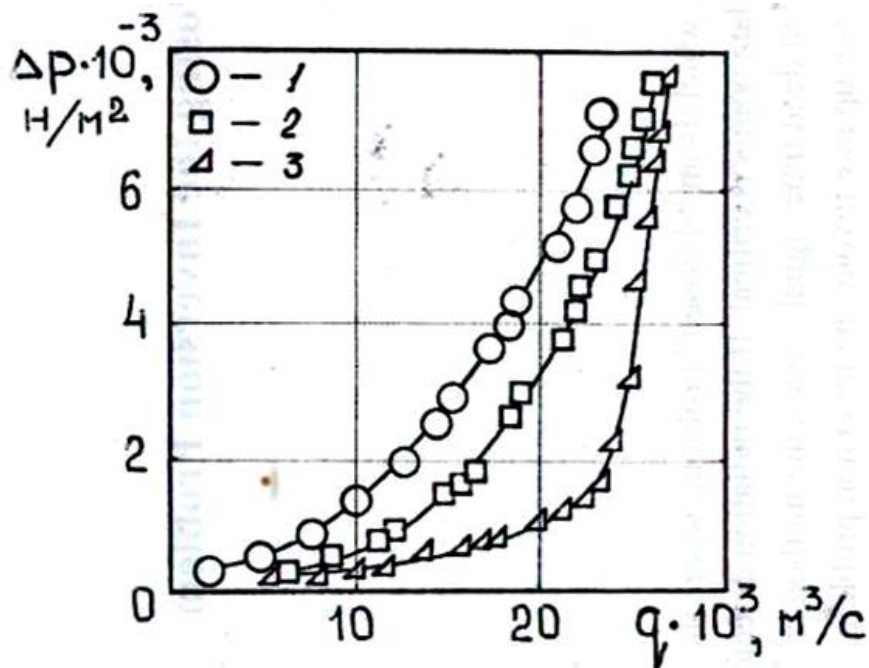


Рис. 6. Перепады давления при течении воды (1) и раствора диталана OTS (2,3) концентрации  $C=2,41\%$ , вес.; концентрация хлористого натрия  $C=3\%$ , вес.; 2, 3 - расстояние участка измерения от выхода насоса 23 м и 95 м, соответственно; температура раствора  $T=8,5^{\circ}\text{C}$ . Данные работы [22]

На рис. 7 приведены результаты исследования механической деструкции при различных температурах в водном растворе «метаупона» концентрации  $C = 1,85\%$ , вес. [22]. По оси абсцисс отложен расход жидкости  $q$ , а по оси ординат – потери давления  $\Delta P_c$  по всей системе и на прямых участках (длиной 5 м)  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$ , которые расположены на расстоянии 23 и 95 м от выхода из насоса, соответственно.

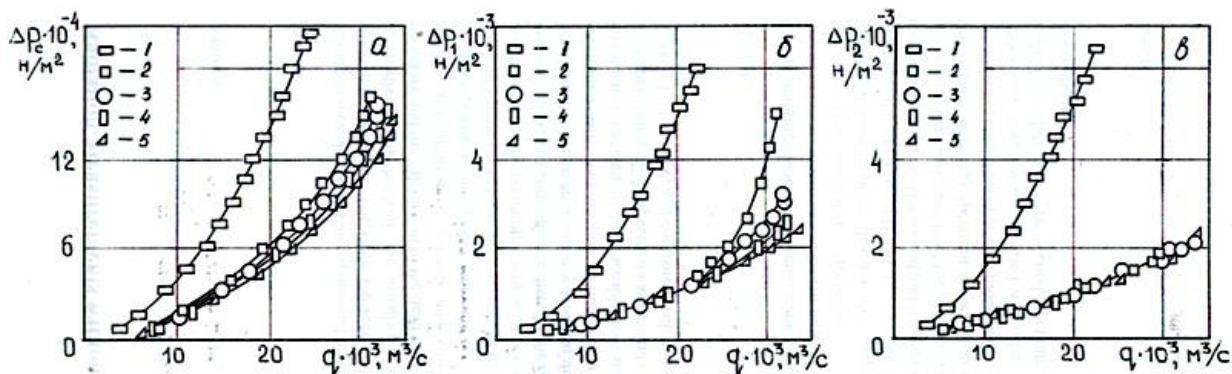


Рис. 7. Потери давления в системе (а) и на прямых участках ( $b - l = 23\text{м}$ ;  $b - l = 95\text{ м}$ ) при течении воды (1) и раствора метаупона (2-5) концентрации  $C=1,85\%$ , вес.,  $C=7,5\%$ , вес.; 2-5 – температура раствора  $T=2,3; 3,5; 11$  и  $13^{\circ}\text{C}$ , соответственно. Данные работы [22]

Видно, что при данной концентрации метаупона, которая превышает оптимальную, гидродинамическая эффективность раствора на расстоянии 95 м от насоса практически не зависит от температуры (все экспериментальные точки группируются возле одной кривой). Таким образом, увеличивая концентрацию ПАВ можно получать значительное снижение гидродинамического сопротивления трения при низких температурах.

Следует также отметить, что скорость восстановления мицелл при расходах  $q < 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$  не зависит от температуры раствора, а при  $q > 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ , она уменьшается



при понижении температуры, что и приводит к расслоению экспериментальных кривых  $\Delta P_I = \Delta P_I(q)$ . Результаты расчета по относительному уменьшению перепада давления показывают, что величина эффекта во всей системе несколько меньше, чем на прямых участках. Это обусловлено наличием местных сопротивлений, на которых добавки ПАВ проявляют низкую гидродинамическую эффективность.

Таким образом, с точки зрения устойчивости к механической деструкции добавки ПАВ имеют неоспоримые преимущества перед полимерами. В отличие от последних ПАВ после прохождения через насосы восстанавливают гидродинамическую эффективность (эффект «обратимой» деструкции). Данное обстоятельство открывает перспективы их практического применения в замкнутых трубопроводных системах, включающих насосы для перекачки жидких сред, а также в теплообменных аппаратах.

В Донецком национальном университете, с использованием промышленной пасты «метаупон» был разработан состав основного хладоносителя со сниженным гидродинамическим сопротивлением турбулентного трения в напорных трубопроводах шахтной установки кондиционирования воздуха (ШУКВ) [27].

Как уже отмечалось введение в поток жидкости гидродинамически-активных добавок мицеллообразующих МПАВ приводит к уменьшению турбулентного теплообмена. Это может ухудшить тепловой режим работы холодильной установки. В связи с этим были проведены специальные исследования по влиянию добавок МПАВ на холодопроизводительность типового воздухоохладителя (типа АРВЭ) и жидкостного кожухотрубного теплообменников [28].

Зависимость коэффициента теплоотдачи  $K$  в жидкостном теплообменнике от расхода хладоносителя  $q$  до и после введения добавок МПАВ приведена на рис. 8.

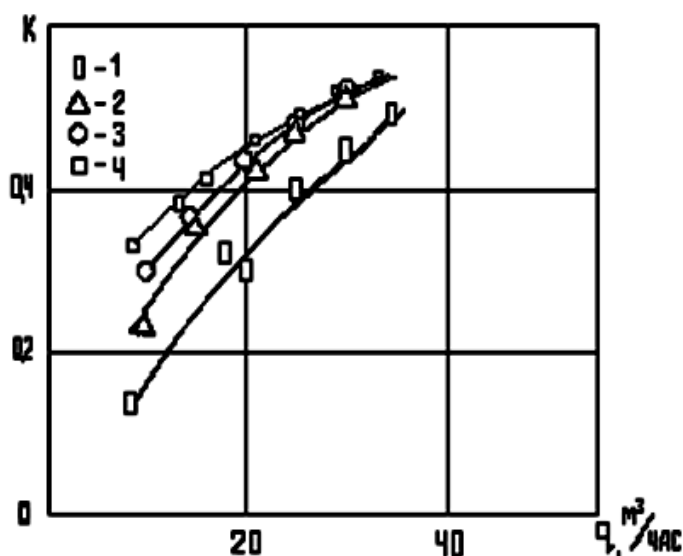


Рис. 8. Зависимость коэффициента теплоотдачи в кожухотрубном теплообменнике ТВД от расхода хладоносителя. 1-4-концентрация метаупона 2,17; 1,18; 0,88 и 0 %, соответственно; содержание хлористого натрия в хладоносителе 7,5 %, вес. Данные работы [28]

Видно, что в области малых расходов введение МПАВ приводит к уменьшению коэффициента теплоотдачи. В диапазоне рекомендуемых расходов (20-35  $\text{м}^3/\text{час}$ ) в случае, если содержание ПАВ в хладоносителе не превышает  $\sim 1,2$  %, коэффициент теплоотдачи практически равен коэффициенту  $K$  для воды.

Оценку холодопроизводительности воздухоохладителя, с использованием в качестве хладоносителя водно-солевых растворов метаупона, проводили путем

сравнения данных нормализованной холодопроизводительности до ( $Q_e$ ), и после введения добавок ( $Q_p$ ).

На рис. 9 приведена зависимость относительной холодопроизводительности воздухоохладителя АРВ-1 от расхода  $q$  хладоносителя с добавками ППАВ (технической пасты метаупон).

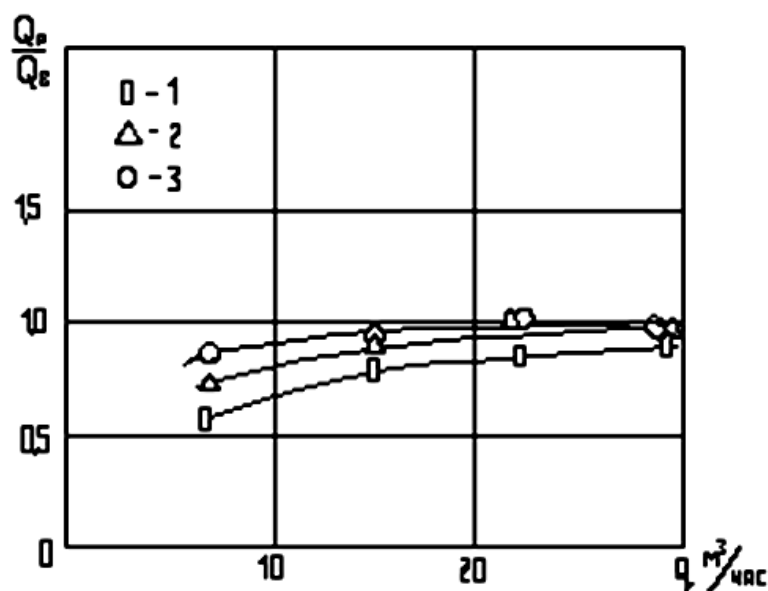


Рис. 9. Зависимость отношения нормализованных холодопроизводительностей воздухоохладителя АРВЭ-1 от расхода хладоносителя. 1-3- концентрация метаупона 2,17; 1,18 и 0,88 %, соответственно. содержание хлористого натрия в хладоносителе 7,5 %, вес. Данные работы [28]

Видно, что введение в хладоноситель добавок метаупона в области концентраций до  $\sim 1,2\%$ , при  $q > 20$  м³/час практически не влияет на холодопроизводительность данного воздухоохладителя.

В связи с вышеизложенным можно сделать вывод, что влияние добавок МПАВ на работу теплообменных аппаратов накладывает определенные ограничения на верхний предел концентрации МПАВ в хладоносителе. Однако, с гидродинамической точки зрения, эти ограничения не существенны, т.к. в разработанном хладоносителе [27] оптимальная концентрация метаупона лежит в диапазоне 1,0-1,85 %.

Таким образом, результаты лабораторных исследований и натурных испытаний показывают возможность практического использования хладоносителей на основе мицеллообразующих поверхностно-активных веществ в замкнутых гидравлических системах.

#### Выводы:

1. Гидродинамически-активные добавки МПАВ могут успешно использоваться для повышения эффективности работы централизованных систем тепло- и холодоснабжения. За счет применения добавок существенно уменьшаются энергозатраты на транспортировку тепло- и хладоносителей, а для холодильных систем и на производство холода (за счет уменьшения диссипативных потерь).

2. Гидродинамическое проектирование теплообменных аппаратов систем тепло- и холодоснабжения необходимо проводить с учетом особенностей течения растворов гидродинамически-активных веществ через местные сопротивления и вдоль шероховатых поверхностей. Это позволит уменьшить, а в ряде случаев исключить

влияние гидродинамически-активных добавок на температурный режим теплообменных аппаратов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – Москва : Атомиздат, 1979. – 416 с.
2. Гинзбург И. П. Теория сопротивления и теплопередачи / И. П. Гинзбург. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1970. – 375 с.
3. Повх И. Л. Техническая гидромеханика / И. Л. Повх. – Ленинград : Машиностроение, 1976. – 504 с.
4. Ковалевский В. Ф. Теплообменные устройства и тепловые расчеты гидропривода горных машин / В. Ф. Ковалевский. – Москва : Недра, 1972. – 224 с.
5. Повх И. Л. Турбулентное течение и теплообмен жидкости с анизотропной вязкостью / И. Л. Повх, А. Б. Ступин // Тепломассообмен – VI : сборник. – Минск, 1980. – Т. VI, ч. 2. – С. 95-103.
6. Пилипенко В. Н. Механизм снижения сопротивления и тепломассопереноса в турбулентных потоках с добавками различной природы / В. Н. Пилипенко, А. Г. Михайлу // Тепломассообмен – VI : сборник. – Минск, 1980. – Т. VI, ч. 2. – С. 89-94.
7. Повх И. Л. Турбулентный теплообмен при течении слабых растворов полимеров около твердой стенки / И. Л. Повх, А. Б. Ступин // Пристенное турбулентное течение : сборник. – Новосибирск, 1975. – Ч. 2. – С. 224-231.
8. Влияние мицеллообразующих ПАВ на сопротивление и теплообмен в энергетических установках / И. Л. Повх [и др.] // Тепломассообмен и моделирование в энергетических установках : тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Тула, 1979. – Ч. 2. – С. 260-261.
9. Михайлу А. Г. Особенности влияния шероховатости и снижающих сопротивление добавок на турбулентный теплообмен / А. Г. Михайлу, В. Н. Пилипенко // Механика турбулентных потоков : сб. науч. тр. – Москва, 1980. – С. 318-330.
10. Турбулентный теплообмен в слабых растворах полимеров и поверхностно-активных веществ / И. Л. Повх [и др.] // Тепломассообмен-V : сборник. – Минск, 1976. – Т. 7. – С. 284-292.
11. Turbulent Heat Transfer in dilute Surfactant of Polymer Solution / I. L. Povkh [et al.] // Heat Transfer – Soviet Research. – 1978. – Vol. 10, No. 1. – P. 98-105.
12. Хабахпашева Е. М. Турбулентный теплообмен в слабых растворах полимеров / Е. М. Хабахпашева, Б. Н. Перепелица // Тепло- и массоперенос : сборник. – Минск, 1972. – Т. 3. – С. 387-395.
13. Пилипенко В. Н. Трение и теплообмен при турбулентном течении слабых полимерных растворов в гладких трубах / В. Н. Пилипенко // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1975. – № 5. – С. 53-59.
14. Седов Л. И. Трение и теплообмен в пристенных турбулентных потоках жидкостей с полимерными добавками / Л. И. Седов, В. А. Иоселевич, В. Н. Пилипенко // Турбулентные течения : сборник. – Москва, 1977. – С. 7-19.
15. Пилипенко В. Н. Влияние добавок на пристенные турбулентные течения / В. Н. Пилипенко // Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа. – 1980. – Т. 15. – С. 156-257.
16. Хабахпашева Е. М. Конвективный теплообмен в реологических средах / Е. М. Хабахпашева // Реодинамика и тепломассообмен : сборник. – Новосибирск, 1979. – С. 5-46.
17. Хабахпашева Е. М. Течение и теплообмен водных растворов высокополимеров : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Е. М. Хабахпашева ; ИТФ СО АН СССР. – Новосибирск, 1971. – 29 с.
18. Иоселевич В. А. Логарифмический профиль скорости при течении слабого полимерного раствора у шероховатой стенки / В. А. Иоселевич, В. Н. Пилипенко // Доклады АН СССР. – 1979. – Т. 213, № 6. – С. 1266-1269.
19. Симоненко А. П. Основные закономерности эффекта Томса и влияние различных факторов на его величину / А. П. Симоненко, Н. А. Дмитренко, П. В. Асланов // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. – Донецьк, 2016. – № 2 (19). – С. 66-73.
20. Симоненко А. П. Основные закономерности снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения в растворах мицеллообразующих поверхностно-активных веществ / А. П. Симоненко, Н. А. Дмитренко, П. В. Асланов // Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности : материалы I Междунар. науч. конф. (Донецк, 16-18 мая 2016 г.). – Ростов-на-Дону, 2016. – Том 1 : Физико-математические, технические науки и экология / под общ. ред. С. В. Беспаловой. – С. 191-194.
21. Турбулентные течения растворов поверхностно-активных веществ / П. В. Асланов [и др.] // Механика жидкости и газа. – 1980. – № 1. – С. 36-43.

22. Особенности турбулентных течений растворов мицеллообразующих поверхностно-активных веществ / И. Л. Повх [и др.] // Механика турбулентных потоков : сб. науч. тр. – Москва, 1980. – С. 44-69.
23. Повх И. Л. Применение поверхностно-активных веществ для уменьшения турбулентного трения жидкостей в технологических аппаратах / И. Л. Повх, А. Б. Ступин, А. П. Симоненко // Аэродинамика в технологических процессах. – Москва, 1981. – С. 230-240.
24. Ступин А. Б. Гидродинамическое сопротивление водных растворов метаупона / А. Б. Ступин, Г. Г. Бояркина ; Донец. гос. ун-т. – Донецк, 1977. – 5 с. – Деп. в ВИНТИ 12.04.1977, № 1366-77.
25. Повх И. Л. Исследование гидродинамического сопротивления водных растворов полимеров и поверхностно-активных веществ в шероховатых трубах / И. Л. Повх, А. Б. Ступин, Г. Г. Бояркина // Инженерно-физический журнал. – 1979. – Т. 36, № 1. – С. 16-19.
26. Ступин А. Б. Некоторые особенности течения растворов поверхностно-активных веществ и полимеров в шероховатых трубах / А. Б. Ступин, Г. Г. Бояркина ; Донец. гос. ун-т. – Донецк, 1978. – 17 с. – Деп. в ВИНТИ 10.01.1978, № 160-78.
27. А.с. 798157, М. Кл 3 С09 К5/00 F 25В1/00 Хладоноситель / И. Л. Повх [и др.]. – № 2728478/23-06 ; заявл. 19.02.79 ; опубл. 23.01.81, Бюл. № 3.
28. Симоненко А. П. Тепловой режим работы шахтной установки кондиционирования воздуха при использовании хладоносителей со сниженным гидродинамическим сопротивлением трения / А. П. Симоненко, П. В. Асланов, П. К. Костенко // Повховские научные чтения : сб. тр. второго междунар. науч.-практ. семинара / под общ. ред. Ступина А. Б. – Донецк, 2012. – С. 64-70.

*Поступила в редакцию 03.09.2018 г.*

#### RESISTANCE OF FRICTION AND HEAT TRANSFER IN TURBULENT FLOWS OF AQUEOUS SOLUTIONS OF HYDRODYNAMICALLY ACTIVE POLYMERS AND SURFACE-ACTIVE SUBSTANCES

*A.P. Simonenko, P.V. Aslanov, N.A. Dmitrenko, T.K. Guchmazova*

The reduction of hydrodynamic resistance of turbulent friction (HRTF) of liquids with the addition of high molecular-mass polymers (HMP) and micelle-forming surfactants (MSAS) has prospects for wide practical application. In addition, the study of the physical nature of the effect of reducing HRTF leads to a better understanding of the basic laws of near-wall turbulent flows.

In the present article, based on the available publications, the main regularities of the influence of hydrodynamically active additives on friction resistance and heat transfer in turbulent fluid flows are systematized and recommendations on hydrodynamic design of heat exchangers for centralized heat and cold supply systems are developed.

**Keywords:** turbulence, friction resistance, hydrodynamically active additives, polyacrylamide, metaupon, heat transfer, basic laws, hydrodynamic design, heat exchangers.

#### **Симоненко Александр Петрович**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.  
E-Mail: [sap2012@rambler.ru](mailto:sap2012@rambler.ru)

#### **Simonenko Alexander Petrovich**

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor of the Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

**Асланов Пётр Васильевич**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,  
ДНР, г. Донецк.  
E-Mail: [aslanov.fnpme@gmail.com](mailto:aslanov.fnpme@gmail.com)

**Aslanov Petr Vasilyevich**

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk National University,  
DPR, Donetsk.

**Дмитренко Никита Александрович**

старший научный сотрудник кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,  
ДНР, г. Донецк.  
E-Mail: [nikita.a.dmitrenko@ya.ru](mailto:nikita.a.dmitrenko@ya.ru)

**Dmitrenko Nikita Aleksandrovich**

Senior Researcher, Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Pokh of Donetsk National University,  
DPR, Donetsk.  
E-Mail: [nikita.a.dmitrenko@ya.ru](mailto:nikita.a.dmitrenko@ya.ru)

**Гучмазова Тамара Константиновна**

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

**Guchmazova Tamara Konstantinovna**

Postgraduate, Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Pokh of Donetsk National University,  
DPR, Donetsk.

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

---



УДК 532.529

### БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД В АЭРОТЕНКАХ С ЗАТОПЛЕННОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ АЭРАЦИИ

© 2018 *А.Ю. Лучина, Ф.В. Недопекин*

---

Продемонстрирована технология, которая обеспечивает биологическую очистку хозяйственно-бытовых сточных вод от органических и минеральных загрязнений в аэротенках с затопленной системой аэрации. Проанализированы факторы, влияющие на распределение активного ила по всему объему аэротенка, а также на гидродинамическую обстановку. Построена двухскоростная модель движения газожидкостной смеси в аэротенках с пневматической системой аэрации. Сделана оценка влияния глубины погружения аэрационной колонны. Разработаны рекомендации к реконструкции очистных сооружений в Донецкой области.

**Ключевые слова:** биологическая очистка; хозяйственно-бытовые сточные воды; активный ил; гидродинамическая обстановка; пневматическая система аэрации; математическая модель.

---

**Введение.** Сточные воды очень разнообразны по своему составу, а значит – и по свойствам. Знание состава сточных вод и характера присутствующих примесей является главным условием, которое позволяет правильно выбрать методы их очистки и составить оптимальную технологическую систему очистных сооружений [1].

В настоящее время главную роль в технологиях очистки основной массы хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод играет биологический метод очистки стоков, что обусловлено его технологическими и экономическими преимуществами по сравнению с другими известными методами. Микробиологическая очистка основана на использовании закономерностей биохимического окисления загрязнений микроорганизмами и физиологического самоочищения рек и других водоемов.

На сегодняшний день основным сооружением в технологической схеме является аэротенк, который зарекомендовал себя стабильной работой и высокой степенью очистки. Среди систем аэрации наибольшее распространение получили пневматические и механические [2]. Для аэротенков шахтного типа глубиной свыше 5 м наиболее надежными являются системы затопленного эрлифта на основе диспергаторов, расположенных в глубине бассейна. Пневматическая система аэрации характерна тем, что воздух выполняет как функцию обеспечения активного ила кислородом, так и функцию перемешивания всего содержимого аэротенка [3].

Воздух поступает в жидкость в виде пузырьков, которые всплывают и при движении через слой воды передают в нее кислород. Чем меньше размер пузырьков, тем большее количество кислорода переходит в жидкость из воздуха и, следовательно, тем ниже затраты энергии на работу аэрационного оборудования. Однако для получения мелких пузырьков требуется больше затрат энергии на диспергирование воздуха.

Эффективность аэрационной системы, обеспечивающей кислородом активный ил и перемешивание стоков в аэротенках – один из важнейших факторов, определяющих окислительную мощность очистных сооружений и глубину процессов биологической очистки [4]. При этом, эксплуатационные и капитальные затраты на аэрацию составляют соответственно до 30% от общих затрат и до 80% потребляемой сооружениями электроэнергии.

**Постановка задачи.** Целью данного исследования является анализ основных факторов, влияющих на распределение потоков жидкости и, соответственно, распределение хлопьев активного ила по объему биореактора, а также построение двухскоростной математической модели движения газожидкостной системы. Получение детальной картины поля скорости и распределения активного ила по всему объему аэротенка экспериментально является очень трудоемкой задачей, в большинстве случаев невыполнимой. В настоящее время решение подобных задач стало возможным с использованием методов численного моделирования.

Факторы, влияющие на процесс образования пузырей можно разделить на конструктивные параметры, опции, связанные со свойствами газа и жидкостей и режимные характеристики. Свойства системы включают поверхностное натяжение на границе раздела фаз, плотность, вязкость и др. К режимным характеристикам относятся объемный расход диспергируемой фазы, величина и направление скорости сплошной фазы, высота уровня жидкости в колонне, перепад давления и температура [5].

Совершенствование систем аэрации сточных вод позволяет в значительной мере интенсифицировать процессы биологической очистки, снизить эксплуатационные расходы и затраты электроэнергии, что обуславливает актуальность данного исследования [6, 7, 8].

Среди факторов, влияющих на качество и эффективность очистки сточных вод, выделяют кинетические и гидродинамические параметры. Основными условиями, обеспечивающими нормальное протекание процессов биоокисления в аэротенке, являются: равномерное распределение биомассы активного ила в объеме сооружения, оптимальное взаимодействие микроорганизмов с субстратом органических загрязнений и перенос растворенного кислорода в зону этого взаимодействия, температура окружающей среды для роста микроорганизмов и протекания химических реакций

Процессы, происходящие в аэротенке, в значительной степени определяются его геометрическими параметрами (размерами, формой и объемом), расположением системы аэрации в бассейне, глубиной ее погружения и интенсивностью подаваемого воздуха [8].

Для определения соотношений циркуляционных потоков предлагается математическая модель, позволяющая определить поле скоростей в зависимости от геометрических параметров, глубины расположения циркуляционной колонны в объеме сооружения, наполненной жидкостью, в зависимости от количества вносимого воздуха.

Теоретические и экспериментальные исследования проводились на очистных сооружениях Старобешевской ТЭС в поселке городского типа Новый Свет (Донецкая область) общей производительностью 6000 м<sup>3</sup>/сутки.

Исследования проводились на промышленном аэротенке-смесителе шахтного типа. Основная часть реактора, где происходит микробиологическая очистка сточных вод, представляет собой цилиндр-стакан диаметром 8 м и глубиной 8 м, который расположен в земле и заполнен сточной водой и активным илом. Внутри цилиндра-стакана (в центральной части аэротенка) расположена затопленная аэрационно-

циркуляционная колонна. Она представляет собой усеченную пирамиду, верх которой опущен ниже уровня воды на 3,5 м, а низ приподнят над дном на 1 м. Размеры верхнего сечения колонны 2,5×2,5 м, нижнего 1×1 м и общая высота 3,7 м. Внутри колонны на глубине 4,8 м размещена аэрационная система из тканевых аэраторов трубчатой конструкции диаметром 100 мм, которая обеспечивает замкнутую вертикальную циркуляцию потока жидкости в аэротенке и растворение кислорода в жидкости (рис. 1).

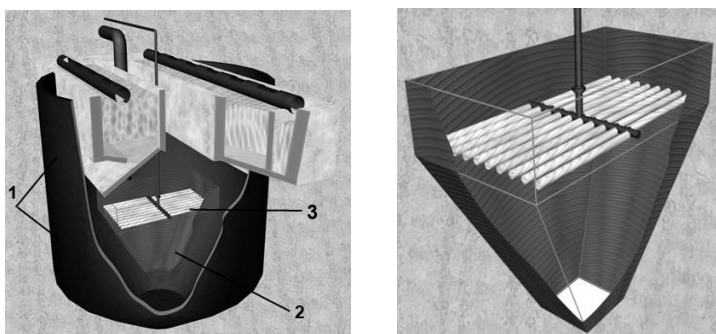


Рис. 1. Общий вид ПРНД и размещение в нем циркуляционной колонны: 1 – аэротенк; 2 – аэрационная колонна; 3 – диспергатор воздушных масс.

**Алгоритм решения задачи.** При решении задачи предполагалось: процесс стационарный; жидкость изотермическая и несжимаемая; физические характеристики однородны и изотропны; процессы в установке считаются симметричными относительно оси; химические реакции и массообменные процессы не учитываются.

Гидродинамические процессы в системе аэротенк – аэрационная колонна описываются уравнениями Навье-Стокса и неразрывности в цилиндрической системе координат [9] и в двумерной осесимметричной постановке имеют следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial r} + v \cdot \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} + \mu_{\text{эф}} \cdot \Delta u - \frac{u}{r}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \mu_{\text{эф}} \cdot \Delta v + f_v; \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u}{z} = 0, \quad (3)$$

где  $u$ ,  $v$  – проекции на оси  $r$  и  $z$  векторов скорости течения жидкости, м/с;  $p$  – давление, Па;  $\rho_0$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{\text{эф}} = \mu + \mu_t$  – коэффициенты динамической и турбулентной вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $f_v$  – приведенная сила межфазного взаимодействия, м/с<sup>2</sup>.

При учете влияния пузырьков воздуха на характер движения газожидкостной смеси система (1) – (3) дополняется следующими уравнениями движения пузырьков газа и относительной скорости:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(u_r \cdot r \cdot N)}{\partial r} + \frac{\partial(N \cdot v_r)}{\partial z} = f_N;$$



$$u_{\Gamma} = u + u_{отн}; \quad v_{\Gamma} = v + v_{отн},$$

где  $u_{\Gamma}$ ,  $v_{\Gamma}$ ,  $u_{отн}$ ,  $v_{отн}$  – проекции на оси  $r$  и  $z$  векторов скорости переноса газовой фазы в объеме аэротенка и скорости движения газовой фазы относительно жидкости, м/с.

Взаимодействие жидкой и газовой фаз описывается слагаемым  $f_V$ , в котором учитывается подъемная сила и гидродинамическое сопротивление:

$$f_V = g \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0}\right) + \frac{3}{8} \cdot \xi \cdot \alpha \cdot \frac{(v_{\Gamma} - v)^2}{r_n},$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления пузыря;  $\rho = \rho_0(1 - \alpha)$  – плотность газожидкостной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $r_n$  – радиус пузырька, м;  $\alpha$  – коэффициент газосодержания, который можно найти следующим образом, зная общее число пузырьков в единице объема  $N$ :

$$\alpha = \frac{4}{3} \pi r_n^3 N.$$

Процесс образования дисперсной фазы происходит только в определенной области объемом  $V_N$ :

$$f_N = \frac{Q_{\Gamma}}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_n^3 \cdot V_N},$$

где  $Q_{\Gamma}$  – объемный расход газа;  $V_N$  – объем зоны, в которую поступает газ. Для области вне зоны попадания пузырьков  $f_N = 0$  [10, 11].

При определении источников членов  $f_N$  и  $f_V$  было допущено, что, попадая в воду, газ дробится на пузырьки одинакового радиуса и это происходит в области объемом  $V_N$ .

Для замыкания уравнений гидродинамики использовалась стандартная  $k$ - $\varepsilon$ -модель турбулентности, т.е. решаются еще два уравнения для транспорта кинетической энергии турбулентности и диссипации турбулентности (число Рейнольдса имеет порядок  $Re \approx 10^5$ , течение носит турбулентный характер) [9].

Система уравнений дополняется начальными и граничными условиями. На нижней и боковых границах расчетной области использовалось условие прилипания:  $\vec{v} = 0$ . На верхней границе расчетной области выполняется условие скольжения:  $\vec{v} \times \vec{n} = 0$ . Деформацией свободной поверхности можно пренебречь, т.к. высота деформации ( $\sim 0,05$  м) бесконечно мала по сравнению с глубиной аэротенка (8 м) [9].

Такая модель позволяет учитывать разность скоростей жидкой и газовой фаз, и предполагает использование стационарной формы, размеров и скорости газовых пузырей, что вполне допустимо в аэротенках с пневматической системой аэрации. Однако трудности расчетов заключаются в ограниченности компьютерных ресурсов и вычислительной трудоемкости таких моделей.

Эффективность пневматических систем аэрации биореакторов зависит от продолжительности контакта пузырьков воздуха с жидкостью. Построенная модель позволяет определить гидродинамические параметры потока жидкости в аэротенке, а также интенсивность аэрации для обеспечения необходимых скоростей на входе в аэрационно-циркуляционную колонну. Таким образом, полученная математическая модель позволит переносить расчетные данные на промышленные очистные сооружения биологической очистки сточных вод.

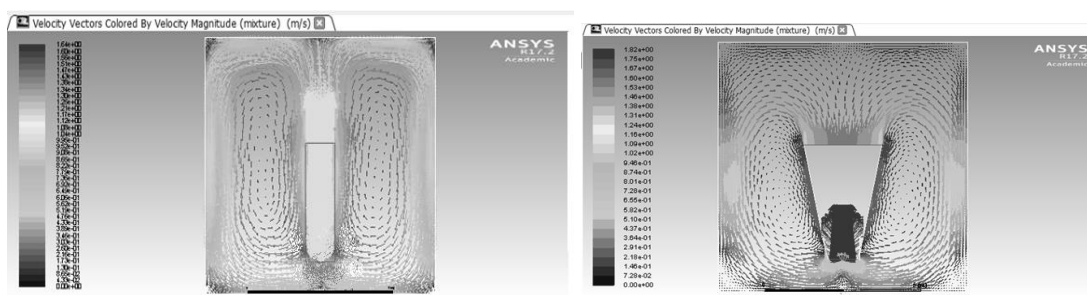
**Анализ результатов.** При численном решении задачи гидродинамических процессов в аэротенке рассмотрена цилиндрическая область, заполненная водой, которая соответствует геометрическим параметрам цилиндра-стакана (рис. 1). В этот объем установлена цилиндрическая (рис. 2а) и конусообразная (рис. 2б) аэрационно-циркуляционная колонна (вместо усеченной пирамиды в натурном аэротенке) с тем, чтобы рассматриваемая в задаче пространственная область течения была симметрична относительно оси аэротенка (данное допущение вполне приемлемо, оно делается всегда при решении аналогичных гидродинамических циркуляционных задач в замкнутых объемах). Жидкость в колонне отделена от жидкости в объеме цилиндра-стакана боковой гранью. На границе верхней части колонны располагается диспергатор воздуха (аэрационная система из тканевых аэраторов трубчатой формы).

В программном пакете для реализации условия прилипания использовался логарифмический переход для скорости.

Гидродинамическая обстановка в модели аэротенка при центральном расположении мелкопузырчатого аэратора у дна аэротенка характеризуется двумя контурами циркуляции с вращением по часовой (правый контур) и против часовой стрелки (левый контур) (рис. 2).

Полученное поле распределения скоростей характеризуется неравномерным распределением ила по сечению аэротенка. Уменьшение скорости циркуляции жидкости в центре кольца способствует коагуляции активного ила с образованием крупных хлопьев, дробящихся в струях воды, имеющих большую скорость.

На рис.2. наблюдается: 1) зона восходящих потоков, находящихся вблизи колонны и обусловленных активной подачей из диспергатора воздушных масс; 2) зона нисходящих потоков, которые находятся на расстоянии 4-5 диаметров колонны; 3) застойные зоны в углах аэротенка и центральной части внешнего потока, где отсутствует перемешивание и вовлечение активного ила в поток.



а) цилиндрическая колонна;

б) конусообразная колонна;

Рис.2. Образ экрана, на котором смоделирована структура гидродинамических потоков, полученная в интегрированном пакете программ ANSYS 17.2 Academic.

Газожидкостная смесь наиболее турбулизована на выходе из колонны, таким образом, насыщение активного ила кислородом происходит более интенсивно в первой зоне. Затем воздух, частично растворившийся в воде и частично вышедший в

окружающую среду, не насыщает углы системы, отдаленные от ее центра и от аэрационно-циркуляционной колонны.

Несмотря на то, что колонна конусообразной формы создает более развитую вихревую структуру, а, значит, насыщение активного ила кислородом происходит интенсивнее, колонны цилиндрической формы проще в изготовлении, установке и дальнейшей эксплуатации.

В результате численного моделирования гидродинамических процессов в аэротенке были сделаны выводы о том, что интенсивность перемешивания нисходящего потока зависит от глубины погружения колонны. Функционалом в данном случае является плотность кинетической энергии.

При изменении глубины погружения колонны получены следующие результаты (рис. 3). Расположение колонны на расстояние 0,5 м от дна аэротенка позволяет добиться более быстрого установления стабилизации гидродинамического режима, скорость потока в этом случае быстрее достигает максимального значения.

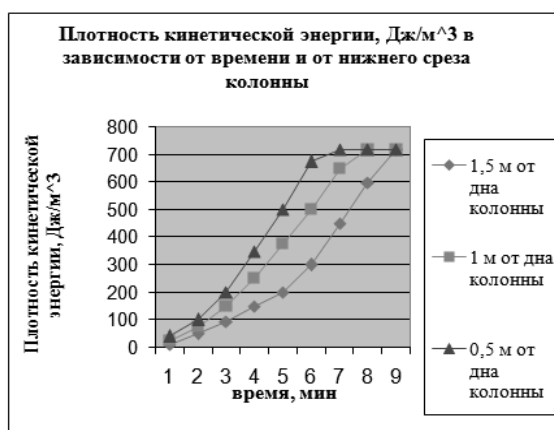


Рис.3. Плотность кинетической энергии  $E$ , Дж/м<sup>3</sup> в зависимости от времени и глубины погружения колонны в аэротенк

В результате погружения колонны на глубину 1,5 м установлено, что стабилизация гидродинамического режима в аэротенке будет происходить медленнее. Оптимальной глубиной погружения можно считать расстояние в 1 м (12,5%) от дна аэротенка. Скорость потока в придонных слоях варьируется от 1 до 1,2 м/с, ил взмучивается и вовлекается в колонну, тем самым, исключается возможность его оседания в донной части сооружения. Однако для достижения высокой эффективности работы аэротенков с аэрационной колонной цилиндрической формы необходимо располагать ее входную часть на расстоянии 0,5 м от днища аэротенка.

**Заключение.** В результате работы обнаружено, что эффективность очистки сточных вод от загрязнений в значительной степени зависит от организации гидродинамических и массообменных процессов в аэрационном сооружении (аэротенке), являющемся основным функциональным звеном технологической схемы аэробной биологической очистки. Основными факторами, влияющими на выбор оптимальных режимов работы аэротенков, считается гидродинамическая схема течения потоков и эффективность процесса насыщения жидкой среды кислородом воздуха, подаваемого системами аэрации.

Построенная двухскоростная математическая модель позволяет учитывать взаимное влияние жидкой и газовой фаз и прогнозировать распределение полей

скорости в аэротенке в зависимости от геометрических параметров и расположении по глубине в аэротенке циркуляционной колонны.

Предложены рекомендации к реконструкции существующих очистных сооружений:

- переоборудовать двухъярусные отстойники в аэротенки-отстойники;
- осуществлять аэрацию с помощью аэрационно-циркуляционной колонны;
- в качестве аэрационных устройств использовать аэраторы определенной геометрической конструкции;
- создавать более развитую поверхность колонны для дополнительного неподвижного закрепления микрофлоры.
- для ликвидации застойных зон проектировать аэротенки с закругленными углами, причем линия закругления должна соответствовать нулевой линии тока потока газожидкостной системы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов Ю. В. Водоотведение и очистка сточных вод : учеб. для вузов / Ю. В. Воронов. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2009. – 760 с.
2. Максимова С. В. Совершенство систем аэрации сооружений биологической очистки сточных вод с использованием эрлифтных устройств : тез. науч. работы. – Москва : Наука, 2006. – 135 с.
3. Нездойминов В. И. Гидродинамическая модель работы аэротенка с затопленной эрлифтной системой аэрации / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков // Коммунальное хозяйство городов. – 2010. – № 93. – С. 353-358.
4. Пронин А. А. Гидродинамика и массопередача кислорода в аэрационных сооружениях : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 03.00.23 / А. А. Пронин ; ВНИТИБП РАСХН Моск. ин-т коммун. хоз-ва и строительства. – Москва, 2005. – 23 с.
5. Губайдуллин Д. А. Численное моделирование турбулентного восходящего потока газожидкостной пузырьковой смеси в вертикальной трубе. Сравнение с экспериментом / Д. А. Губайдуллин, Б. А. Снигерев // Теплофизика высоких температур. – 2018. – Т. 56, вып 1. – С. 61-70.
6. Казаков В. Д. Исследование гидродинамики циркуляционных потоков жидкости в аэротенке, возникающих под действием аэрирующих систем / В. Д. Казаков, Н. Д. Пельменёва // Вестник Иркутского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2010. – № 2. – С. 162-166.
7. Нездойминов В. И. Определение параметров газожидкостной смеси в затопленных эрлифтных системах / В. И. Нездойминов, В. С. Рожков // Определение параметров газожидкостной смеси в затопленных эрлифтных системах. Науковий вісник будівництва ХДТУБА. – Харків, 2008. – № 49. – С. 131–136. 10.
8. Газогидродинамическая обстановка и распределение активного ила в сооружениях биологической очистки сточных вод / В. Н. Кульков [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. Строительство и архитектура. – 2008. – № 4. – С. 48-52.
9. Bezdrovna M. Recommendation of sewage treatment facilities and improvement of their efficiency / M. Bezdrovna, O. Kazak, A. Luchyna // Interdisciplinary Integration of Science in Technology, Education and Economy : monograph / ed. by J. I. Shalapko, B. Zoltowski – Bydgoszcz, 2013. – P. 122-127.
10. Бакакин А. В. Математическая модель теплообменных процессов в ковше при обработке металла инертным газом / А. В. Бакакин [и др.] // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1985. – № 9. – С. 51-54.
11. Недопекин Ф. В. Моделирование гидродинамических и теплообменных процессов в металлургических технологиях [Электронный ресурс] / Ф. В. Недопекин, В. В. Белоусов // Вестник Удмуртского университета. Серия 4 : Физика и химия. – 2008. – Вып. 1. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : <file:///C:/Users/o.shvakina.DONRU/Downloads/Modelirovanie-gidrodinamicheskix-i-teplomassoobmennyx.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения : 02.04.2019.

*Поступила в редакцию 03.10.2018 г.*

**BIOLOGICAL TREATMENT OF WASTEWATER IN AEROTANKS WITH FLOODED PNEUMATIC AERATION SYSTEM**

*A.Y. Luchyna, F.V. Nedopekin*

The technology that provides biological treatment of domestic wastewater from organic and mineral contaminants in aerotanks with a flooded aeration system is demonstrated. Factors affecting the distribution of activated sludge throughout the entire aeration tank, as well as the hydrodynamic situation, are analyzed. A two-speed model of the motion of a gas-liquid mixture in aerotanks with a pneumatic aeration system is constructed. The effect of the depth of immersion of the aeration column is estimated. Recommendations for the reconstruction of treatment facilities in the Donetsk region have been developed.

**Keywords:** biological treatment; domestic sewage; activated sludge; hydrodynamic situation; pneumatic aeration system; mathematical model.

**Лучина Анастасия Юрьевна**

старший преподаватель кафедры общей физики и методики физики ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,  
ДНР, г. Донецк.

E-mail: anastasii.luchyna@gmail.com

**Luchyna Anastasiia Yurievna**

Senior Lecturer at Department of General Physics and Didactics of Physics of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

**Недопекин Федор Викторович**

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

E-mail: f.nedopekin@gmail.com

**Nedopekin Fedor Victorovich**

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk National University,

DPR, Donetsk.

УДК 504.05

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ-АКТИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ ПОЛИМЕРНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ТОКСИКАНТОВ В ЛИТОСФЕРЕ

© 2018 *А.П. Симоненко, И.А. Артемова*

Применение созданных и усовершенствованных в Донецком национальном университете водорастворимых композиций на основе гидродинамически-активных полимеров в значительной мере упрощает практическую реализацию технологии полимерной локализации токсикантов в литосфере.

В представленной статье особое внимание уделено свойствам водорастворимых композиций, созданных на основе высокомолекулярных полиэтиленоксида и полиакриламида (суспензиям, пастам, покрытиям, брикетам), которые с применением специальных генераторов обеспечивают приготовление за малые промежутки времени однородных растворов с максимальным сохранением молекулярной массы полимеров.

На основе результатов оценки экологической эффективности барражной (водонепроницаемой) завесы вокруг пруда-испарителя Кременчугского нефтеперерабатывающего завода, проведенного специалистами Украинского научного центра охраны вод и АО «Укрнафта», определены места наиболее эффективного применения технологии полимерной локализации нефтепродуктов и фенола под землей.

**Ключевые слова:** гидродинамически-активные композиции, полиэтиленоксид, полиакриламид, генераторы приготовления растворов, токсиканты, литосфера, полимерная локализация.

**Состояние проблемы.** Безопасность жизнедеятельности в послеаварийный период на атомных электростанциях, химически опасных нефтеперерабатывающих предприятиях, на магистральных трубопроводах подачи нефти и нефтепродуктов, образующиеся фильтрационные воды мусорных полигонов, а также масштабы загрязнения биосферы во многом зависят от быстроты и эффективности локализации токсикантов, попавших в литосферу. Движение различных экотоксикантов и радиоактивных веществ в литосфере определяется ее гидрологическим режимом. Снизить скорость течения загрязненной воды под землей можно с помощью методов, существенно уменьшающих или полностью исключающих проницаемость земельных пластов[1].

Анализ научных публикаций и патентов на изобретения по существующим методам локализации загрязненных участков не отвечает современным экологическим требованиям, так как они почти полностью разрушают педосферу, требуют больших капитальных и трудовых затрат, имеют главный недостаток - длительное время реализации. Существующие на сегодняшний день методы связаны с укладкой в землю гидроизоляции, нагнетания цементирующего раствора и жидкого азота в пласт[2-4]. Из известных наиболее эффективным является способ, в основу которого положена гидродинамическая резка грунтов с последующим заполнением образовавшейся щели глиняным, гипсовым растворами или асфальтобитумной эмульсией. Этот способ позволяет создавать подземные водонепроницаемые экраны на глубину до 10 м, но для его реализации требуется специальное оборудование[5].

В настоящей работе приведены результаты исследований авторов работы [1] физико-химической природы проявления эффектов упругих деформаций при течении заранее приготовленных растворов полимеров в пористых средах и на этой основе разработаны эколого-технологические критерии применения способа полимерной локализации токсикантов в литосфере.

Авторы работы [6] провели оценку экологической эффективности барражной (водонепроницаемой) завесы вокруг пруда-испарителя Кременчугского нефтеперерабатывающего завода (НПЗ).

Пруд-испаритель изначально проектировался, как гидротехническое сооружение, предназначенное для приёма и испарения сточных вод, которые образуются в процессе переработки нефти и нефтепродуктов на Кременчугском НПЗ. При этом предполагалось, что это пруд будет представлять собой практически нефилтующее сооружение. Для защиты подземных вод от загрязнения вокруг пруда была сооружена противофильтрационная завеса длиной 7,5 км, выполненная из бентонитовых глин и суглинков методом экскаваторного черпания. Для её устройства была прорыта траншея шириной по верху 2 м, по низу – 0,5 м, глубиной 10-15 м (до песчаных глин харьковской свиты). Предполагалось, что завеса будет перекрывать всю мощность потока с заглублением её основания на 0,5-1,0 м в водоупорные суглинки. Проектный коэффициент фильтрации завесы предусматривался 0,001 м/сут.

Однако, результаты натурных исследований введённого в эксплуатацию пруда-испарителя показали, что он отрицательно влияет на подземные и взаимосвязанные с ними поверхностные воды, которое проявляется в изменении гидродинамического и гидрохимического режимов подземных вод прилегающей территории, а также загрязнение подземных вод нефтепродуктами и фенолами.

В ходе тщательных исследований были установлены основные причины вызывающие экологическую опасность пруда-испарителя. Прежде всего это связано с тем, что противофильтрационная завеса, построенная по принципу «стена в грунте», опирается не на водонепроницаемые, а фильтрующие породы с коэффициентом фильтрации 0,5-1,0 м/сут, что даёт возможность фильтрации в обход «стенки» под неё, а в самом теле завесы выявлены «гнезда» песков и супесей с высокими фильтрационными свойствами.

Кроме этого при повышенных уровнях жидкости в пруде-испарителе происходит увеличение фильтрационных потерь не только через основание и завесу, но и через ограждающие дамбы. Специальными исследованиями было также установлено, что под влиянием высокой минерализации и химического состава сточных вод меняются фильтрационные свойства пород основания, дамб и завесы[6].

Оценка эффективности водоохраных мероприятий долей перехвата (предотвращения попадания в окружающую среду сточных вод или загрязняющих веществ) показала, что коэффициент экологической эффективности завесы  $E$  (в долях единицы) равен  $E=(Q_{cm}-Q_f)/Q_{cm}=0,5$ . Здесь  $Q_{cm}$  – расход сточных вод НПЗ (м<sup>3</sup>/сут),  $Q_f$  – интенсивность потерь сточных вод из-за несовершенства барражной завесы вокруг пруда-испарителя, которая для Кременчугского НПЗ равна 3300 м<sup>3</sup>/сут.

Авторы утверждают, что обязательным элементом комплекса водоохраных мероприятий должен быть специальный мониторинг, начинающийся до начала строительства водонепроницаемой завесы. На его основе могут быть уже на ранних стадиях строительства и эксплуатации выявлены и устранены недостатки проектирования и строительства[6].

**Основы полимерной локализации токсикантов в литосфере.** В монографии [1] предложен метод полимерной локализации токсикантов (включая и радиоактивные) и разработаны эколого-технологические критерии его внедрения на основе физико-химических особенностей фильтрационного течения заранее приготовленных однородных растворов гидролизованного ПАА, ПАА и ПЭО. При этом специальными

исследованиями показана возможность перехода ГПАА в воде под действием радиационного  $\gamma$ -излучения в гидрогель.

Переход к режиму течения растворов высокомолекулярных ПАА и ПЭО с повышенной диссипацией энергии сопровождается образованием входной затопленной струи в ячейках порового канала в виде «шнура» или «ленты», окружённой вторичными течениями в виде торообразного вихря.

Особый интерес, с точки зрения локализации токсикантов в литосфере, представляют экспериментальные данные по структурообразованию под воздействием закритических продольных градиентов скорости в полуразбавленных и умеренно концентрированных затопленных полимерных струях.

С практической точки зрения заслуживают внимания данные о диссипативности нестационарного фильтрационного течения, которые показывают, что зависимость диссипативной кривой от частоты пульсационного воздействия на фильтрационное течение растворов полимеров имеет резко выраженный экстремальный характер. Эти результаты позволили предложить частотный режим нагнетания полимерного раствора в пласт (при частоте, соответствующей максимуму  $\Delta\eta_{эф}/\eta_{эф}$  для локализации токсикантов в литосфере), имеющий более высокую эффективность, чем стационарный[1].

При реализации полимерной локализации на практике следует учитывать, что нелинейная фильтрация растворов полимеров обусловлена возникновением автоколебательного режима обратимых процессов разворачивания макромолекул под действием квазирегулярно возникающих продольных градиентов скорости в пористой среде и образованием при этом динамических надмолекулярных структур, что и обеспечивает относительно ровный фронт продвижения полимерного раствора в пористой среде со слоистой неоднородностью[1].

**Цель работы** – обоснование выбора гидродинамически-активных композиций (суспензий, паст, покрытий и брикетов) на основе высокомолекулярных полимеров (полиэтиленоксида, полиакриламида) и генераторов приготовления из них водных растворов для практической реализации в технологиях полимерной локализации токсикантов в литосфере.

**Гидродинамически-активные полимерные композиции.** Не смотря на высокую гидродинамическую эффективность ПЭО и ПАА на сегодняшний день ещё не нашли должного применения для решения проблем энергосбережения и экологии. Прежде всего, это связано с особенностями приготовления из них в больших количествах однородных растворов с максимальным сохранением исходной молекулярной массы. В связи с этим последние десятилетия характеризуются созданием на основе высокомолекулярных полимеров, в том числе и с использованием ПЭО и ПАА, различных водорастворимых композиций[7].

**Равноплотные тонкодисперсные суспензии и пасты.** В промышленных масштабах ПЭО и ПАА выпускаются в виде порошков различной дисперсности. Так, например, выпускаемый промышленностью порошкообразный ПЭО имеет широкий фракционный состав с преобладанием частиц размером 200-4000 мкм, что существенно затрудняет его переработку при создании жидких водорастворимых полимерных композиций (ЖВПК), покрытий и брикетов с требуемыми свойствами.

В табл. 1 приведен фракционный состав порошкообразных ПЭО WSR-301, WSR-701 и ПЭО-534, полученных измельчением исходных полимерных порошков, с размерами частиц 200-1000 мкм, в условиях охлаждения жидким азотом в присутствии азотсодержащих модифицирующих соединений[7].



Таблица 1. Фракционный состав порошкообразных ПЭО WSR-301, WSR-701 и ПЭО-534 после измельчения исходных порошков при охлаждении азотом

№ п/п	Марка ПЭО	Молекулярная масса	Фракционный состав, % вес.				
			>200 мкм	200-160 мкм	160-100 мкм	100-63 мкм	≤ 63 мкм
1.	WSR-301	4·10 <sup>6</sup>	5,0	11,0	30,0	33,5	20,5
2.	WSR-701	6·10 <sup>6</sup>	10,8	14,2	18,4	23,5	33,1
3.	ПЭО-534	4·10 <sup>6</sup>	6,7	12,8	16,5	34,8	29,2

Тонкодисперсные полимерные суспензии и пасты обладают рядом неоспоримых преимуществ перед порошкообразными полимерами, т.к. характеризуются повышенной скоростью растворения, легко дозируются, в течение длительного времени (до 5 лет) сохраняют свои физико-химические свойства.

Наряду со свойствами дисперсной фазы (ДФ), которые определяются особенностями технологии их синтеза в условиях производства, важную роль при создании суспензий и паст играют составы дисперсионных сред (ДС). При этом особо следует отметить, что в состав ДС могут быть введены самые различные добавки, которые расширяют границы применения полимера и значительно улучшают его физико-химические свойства и эксплуатационные качества.

С учетом вышеизложенного можно определить общие требования к ДС полимерных суспензий и паст. Прежде всего, ДС не должна растворять полимер, но в тоже время сама должна хорошо растворяться в воде. С целью обеспечения седиментационной устойчивости она должна иметь плотность равную или очень близкую истинной плотности полимерных частиц. Для упрощения процесса дозирования и смешения с водой вязкость ДС суспензий и паст должна быть минимальной и слабо зависеть от температуры [7-9].

Очевидно, что с учетом многообразия требований к физико-химическим свойствам и особенностям применения жидких композиций в различных технологических процессах создать универсальную ДС не представляется возможным. Кроме этого в каждом конкретном случае использования возникает необходимость наряду с основным назначением – например, снижением гидродинамического сопротивления трения, придать ЖВПК другие важные свойства.

В табл. 2 в качестве примера приведены составы ДС для приготовления суспензий и паст, на основе тонкодисперсных порошков ПЭО и их вязкости при температуре  $t, ^\circ\text{C} = 20$  с использованием в качестве основной составляющей жидкой фазы глицерина, этиленгликоля и диэтиленгликоля. В особую группу следует выделить ДС, представляющие собой водные растворы щелочных металлов. При этом следует отметить, что применение чистых глицерина, этиленгликоля и диэтиленгликоля не позволяет создать стабильные во времени полимерные суспензии и пасты из-за разности их плотности с истинной плотностью ПЭО. Кроме этого высокая вязкость глицерина, резко увеличивающаяся с понижением температуры, исключает возможность создания на его основе седиментационно-устойчивых быстрорастворимых композиций.

Таблица 2. Составы и величина вязкости ДС для приготовления ЖВПК на основе ПЭО.

№ п/п	Состав ДС и концентрация составных компонентов (% , мас.)	Вязкость, спз при $t, ^\circ\text{C} = 20$
1.	Глицерин марки «Ч»	717,0
2.	Глицерин (87,5) + вода (12,5)	87,3
3.	Этиленгликоль	16,5

4.	Этиленгликоль (87,2) + Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (12,8)	20,7
5.	Этиленгликоль (85,6) + LiJ (14,4)	20,9
6.	Этиленгликоль (84,6) + ОП-10 (7,7) + MoS <sub>2</sub> (7,7)	18,3
7.	Этиленгликоль (60,7) + глицерин (16,65) + мочеви́на (13,4) +LiJ (8,71)	36,4
8.	Диэтиленгликоль	–
9.	Диэтиленгликоль (91,0) + CdJ (9,0)	–
10.	Диэтиленгликоль (89,0) + MnCl <sub>2</sub> (11,0)	–
11.	Вода (88,0) + LiOH (12,0)	1,65
12.	Вода (80,0) + NaOH (20,0)	1,71
13.	Вода (75,0) + KOH (25,0)	1,73

В то же время смесь 87,5 вес.частей глицерина и 12,5 вес. частей дистиллированной воды имеет вязкость в 8,2 раза меньше вязкости глицерина, а ее плотность становится практически равной средней плотности частиц ПЭО. Это позволяет создать равноплотные суспензии и пасты для практического применения в различных технологических процессах.

Полимерные суспензии и пасты на основе водных растворов щелочных металлов – LiOH (7-11) вес. %; NaOH (9-28) вес. % или KOH (12-31) вес. % из всех разработанных ДС имеют наименьшую вязкость. Это позволяет создать полимерные композиции с содержанием активного вещества (ПЭО) до 34,0 вес. %. Кроме этого такие композиции можно приготовить на месте их применения, что значительно уменьшает затраты на ее транспортировку.

В качестве примеров в табл. 3 приведены составы полимерных композиций на основе ПЭО (ПК-1) и ПАА (ПК-2).

Таблица 3. Составы полимерных композиций

ПК-1	масс.%	ПК-2	вес.%
ПЭО: Молекулярная масса 6,5·10 <sup>6</sup> ; размер полимерных частиц не больше 400 мкм	5-25	ПАА: молекулярная масса 6,1·10 <sup>6</sup> ; степень гидролиза 16 %; размер частиц не больше 400 мкм	5-25
Глицерин динамитный	70,5-90,5	Диэтиленгликоль	52,5-72,5
Вода дистиллированная	4,5	Калий йодистый	22,5

Полимерные суспензии и пасты, при определенных условиях практического применения, обладают, по сравнению с другими полимерными композициями рядом неоспоримых преимуществ к основным из которых относится: повышенная скорость растворения полимеров из композиций. Это позволяет непрерывно приготавливать необходимое количество полимерных растворов требуемых концентраций без и с применением специальных генераторов; возможность создания многофункциональных композиций с улучшенными физико-химическими свойствами и повышенной гидродинамической активностью за счет введения в их состав различных солей и ПАВ; сохранение полимером в составе суспензий и паст своих свойств в процессе длительного хранения и т.д.

Проведенные авторами работ [7-9] экспериментальные исследования показали, что в процессе создания основ технологии приготовления жидких композиций и при разработке практических рекомендаций по их использованию необходимо: установить пределы концентраций в них полимерных порошков, с сохранением текучести

разрабатываемых суспензий и паст; определить их плотность, вязкость, агрегативную и седиментационную устойчивость, а также скорость и полноту растворения полимерных частиц в различных условиях.

Высококонцентрированная суспензия ПЭО [7, 10-12]. В ряде случаев, при использовании суспензий ПЭО возникает необходимость в применении композиций с повышенным полимеросодержанием. Особо остро эта проблема может стоять при использовании таких композиций на автономных объектах, возможности которых ограничены по хранению и транспортировке большого количества полимерных материалов, а также в мобильных установках, при использовании которых возникает необходимость доставки таких материалов на большие расстояния.

В процессе проведенных исследований было установлено, что создать композицию с повышенным содержанием полимера представляется возможным за счёт введения дополнительно в её состав мелкодисперсного карбоната кальция при следующем соотношении компонентов, вес. %: ПЭО 35 – 60; карбонат кальция 1,8 – 22,0; дисперсионная среда (водно-глицериновая смесь с плотностью 1,22 г/см<sup>3</sup>) – остальное до 100, а также способом ее приготовления, который заключается в том, что порошкообразный ПЭО тщательно перемешивают с мелкодисперсным карбонатом кальция, до получения однородной массы и прессуют под давлением 80 – 100 кг/см<sup>2</sup> в шарики диаметром от 1,0 до 3,0 мм. Полученные таким образом шарики в дальнейшем смешивают с дисперсионной-средой.

Для приготовления суспензии авторы работ [10, 12] использовали ПЭО производства Новосибирского НИИ химической технологии с размерами полимерных частиц меньше 200 мкм и молекулярной массой равной 3 -7 млн. Предварительные исследования показали, что содержание ПЭО в разрабатываемой суспензии не должно превышать 60 % вес., так как его дальнейшее повышение приводит к резкому увеличению вязкости суспензий. Кроме этого происходит уменьшение скорости растворения ПЭО из такой суспензии и, как следствие этого, в течении первых 20 секунд с момента начала растворения снижается гидродинамическая эффективность ее растворов. Размеры частичек порошкообразного карбоната кальция для приготовления смеси с ПЭО не должны превышать 50 мкм. Прессуемые частицы должны иметь строго шарообразную форму, так как в этом случае вязкость суспензии будет минимальной.

Сравнительные испытания реологических свойств полимерной пасты, которая содержала 30% вес. порошка ПЭО с размером полимерных частиц до 200 мкм и высококонцентрированной суспензии с повышенным до 50 % вес. содержанием полимера были проведены на безнасосной установке измерительный участок которой представлял собой трубу диаметром 21,6 мм и длиной 2075 мм. Перепад давления на контрольном участке трубы измеряли манометром «Сапфир 22ДД». Все испытания были проведены при температуре 20°C.

При обработке результатов реологических исследований испытываемых материалов расчеты проводились с использованием следующих формул:

$$\tau = \frac{d\Delta p}{4l} \quad \text{- (напряжение трения на стенке трубы, Па), где } \Delta p \text{ – перепад давления на контрольном участке трубы диаметром } d \text{ и длиной } l;$$

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad \text{- (скорость сдвига, } l/c), \text{ где } u \text{ – средняя скорость движения полимерной суспензии по измерительному участку трубы};$$

$$\gamma = \frac{8u}{d} \quad \text{- (динамическая вязкость, Па с)};$$

$$Re = \frac{ud\rho}{\eta} \text{ - (число Рейнольдса), где } \rho \text{ – плотность полимерной суспензии.}$$

Результаты сравнительных испытаний реологических свойств приведены в табл. 4.

Таблица 4. Динамическая вязкость тонкодисперсной полимерной пасты с повышенным содержанием ПЭО

Состав полимерной суспензии		Содержание ПЭО в суспензии, % вес.	$\gamma$ , л/с	$\tau$ , Па	Re	$\eta$ , Па·с
Дисперсная фаза	Дисперсионная среда					
Тонкодисперсный порошок ПЭО с размером полимерных частиц до 200 мкм	Смесь глицерина с водой плотностью 1,22 г/см <sup>3</sup>	30,0	23,6	221,2	0,18	9,37
			37,4	242,0	0,41	6,47
			60,2	291,5	0,88	4,84
			60,9	317,5	0,83	5,21
Шарики диаметром 2 мм, полученные прессованием смеси тонкодисперсных порошков ПЭО и карбоната кальция под давлением 90 кг/см <sup>2</sup>	“-“	50,0	17,4	135,6	0,16	7,84
			30,6	208,2	0,32	6,80
			48,1	275,9	0,60	5,73
			70,2	335,7	1,04	4,78
			101,1	374,7	1,94	3,71

Из приведенных данных видно, что величина динамической вязкости  $\eta$  суспензии с повышенным полимеросодержанием меньше вязкости полимерной пасты в качестве дисперсной фазы которой используется тонкодисперсный полимерный порошок при числах Рейнольдса равных 0,16 – 0,88. При дальнейшем увеличении числа  $Re$  величины вязкости этих композиций становятся практически равными [7,10,12].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что одним из способов повышения концентрации ПЭО в суспензии до 50% вес. и больше может быть реализован путем прессования смеси тонкодисперсного порошка этого полимера с карбонатом кальция (размер частиц до 50 мкм) с получением шариков диаметром 1,0 – 3,0 мм под давлением 80-100 кг/см<sup>2</sup> и последующим смешиванием этих шариков с дисперсионной средой – смеси глицерина с водой имеющей плотность равную 1,22 г/см<sup>3</sup>.

Водорастворимые полимерные покрытия. Ультраслабые полимерные покрытия на армирующих вставках наносимые нагревом полимерных суспензий УПП (НПС). В ряде случаев, применение жидких полимерных композиций затруднено. Это вызвано тем, что для их дозированного ввода и растворения необходимо применять специальное оборудование, доставка и использование которого требуют значительных дополнительных затрат.

В связи с этим большие перспективы практического применения в таких случаях имеют водорастворимые полимерные покрытия (ВПП), которые позволяют достаточно быстро получать большие количества растворов ПЭО или ПАА без применения специального оборудования [7-9,13].

В ходе физико-химических исследований и технологических проработок были разработаны состав и основы технологии приготовления твердых водорастворимых полимерных композиций (ТВПК) в литьевых формах путём нагрева полимерной суспензии — УПП (НПС) с использованием армирующих вставок различной

конфигурации. Для растворения УПП (НПС), т.е. получения растворов ПЭО, была создана специальная проточная кассета.

С учетом условий формирования потока кассета должна состоять из следующих частей: корпуса, армирующей вставки с УПП (НПС), рассекателей водного потока и соединительных головок. Рекомендуется использовать проточные кассеты, оснащенные брикетами на армирующих вставках трех видов: «пустотелый цилиндр», «спираль» и «плоскопараллельные» пластины.

Флоковые покрытия с водорастворимыми полимерными наполнителями[7,13-17]. Одним из перспективных направлений в решении проблемы создания многофункциональных покрытий может быть использование флоковых покрытий с водорастворимыми полимерными наполнителями. К примеру, такими наполнителями могут быть тонкодисперсные суспензии ПЭО и ПАА с размерами полимерных частиц меньше 63 мкм.

Перед использованием флоковые покрытия пропитывают полимерными наполнителями – тонкодисперсными полимерными суспензиями, которые вымываются либо набегающим потоком (при внешнем обтекании), либо (в случае использования в составе генератора приготовления растворов) потоком воды, подаваемой в генератор (проточную кассету) принудительным способом.

Флоковые материалы представляют собой капроновые ворсинки высотой 0,5 - 1,5 мм, которые наносятся электрофлокированием на покрытые клеевыми составами металлические или пластмассовые основы.

По сравнению с водорастворимыми полимерными покрытиями УПП(НПС) флоковые покрытия имеют ряд преимуществ к основным из которых следует отнести: увеличение количества наносимого полимерного материала; увеличение количества вымываемого полимера за счет большой площади поверхности ворсинок, дополнительно увеличивающей общую площадь поверхности с которой смывается полимерный материал; длина, плотность нанесения и угол наклона ворсинок к поверхности позволяют регулировать скорость поступления полимера в водный поток; в качестве водорастворимых полимерных наполнителей могут быть использованы суспензии ПЭО и ПАА различного назначения.

В зависимости от области применения, объема приготавливаемых растворов, конструкция генератора с флоковым покрытием и составы водорастворимых полимерных наполнителей могут существенно отличаться.

В процессе конструкторских и технологических проработок, было установлено, что наиболее простым в изготовлении и использовании является генератор, активный элемент которого – армирующая вставка с флоковым покрытием, представляет собой набор плоскопараллельных пластин, расположенных на расстоянии 3 мм друг от друга и скрепленных шпильками в пакет. Такой пакет размещается в корпусе генератора, к нижнему торцу которого подаётся вода, а с верхнего отводится приготовленный полимерный раствор.

Такой способ приготовления полимерных растворов открывает широкие перспективы практического применения полимерных композиций в энергосбережении и экологии, т.к. в качестве водорастворимого наполнителя флоковых покрытий могут быть использованы полимерные суспензии самых различных составов, в т.ч. и суспензии специального назначения.

Преимущества применения флоковых покрытий в составе генераторов приготовления растворов заключается в том, что в качестве водорастворимого

полимерного наполнителя в них могут быть использованы не только вновь разработанные суспензии, но и известные суспензии ПААи ПЭО.

**Полимерные брикеты.** Твердые водорастворимые полимерные брикеты (ВПБ) на основе ПЭО, занимают особое место среди полимерных композиций, которые предназначены для СГСТ при турбулентном режиме движения воды и в процессе решения экологических проблем, в т.ч. и в технологиях полимерной локализации токсикантов [18-24].

Главной положительной особенностью этих композиций являются повышенное до 95% вес. полимеросодержание, а также сохранение во времени той формы, которую они получили в матрице при прессовании смеси тонкодисперсного порошка полимера с наполнителем. Однако следует отметить, что применение ПБ предполагает обязательное использование специальных генераторов приготовления из них растворов.

С целью исключения образования в генераторе труднорастворимых сгустков геля, полимерные порошки перед прессованием либо пропитывают жидкостью, которая на первом этапе смешивания с водой замедляет процесс растворения полимерных частиц, либо в качестве наполнителя используют специально подобранные порошки электролитов в результате растворения которых растворяющая способность воды по отношению к полимеру на первой стадии его смешивания с водой, уменьшается.

При дальнейшем смешивании полученных в генераторе так называемых «сырых растворов» с водой образуются однородные растворы, которые могут либо непосредственно использоваться в трубопроводах, либо в концентрированном виде подаваться в трубопровод для дальнейшего до растворения.

При разработке технологии получения брикетов, были опробованы два способа их приготовления: холодное прессование (или так называемое таблетирование) и горячее прессование.

Предварительные экспериментальные исследования влияния на процесс прессования температуры, давления, времени выдержки прессуемого материала под давлением в пресс-форме позволили определить следующие технологические параметры процессов холодного и горячего прессования (см. табл.5)[7].

В ходе проведения исследований было установлено, что процесс горячего прессования сопровождается деструкцией-уменьшением молекулярной массы ПЭО и снижением (или даже полной потерей) его гидродинамической активности в водных растворах.

Таблица 5. Основные параметры, определяющие режимы холодного и горячего прессования порошков высокомолекулярного ПЭО.

№ п/п	Параметры, определяющие процесс прессования	Холодное прессование (таблетирование)	Горячее прессование
1	Температура, °С	20	140
2	Удельное давление, кГ/см <sup>2</sup>	250-300	300
3	Выдержка порошка ПЭО с наполнителем в пресс-форме, мин. На 1 мм толщины брикета	1 мин на 1 мм толщины материала брикета	1 мин на 1 мм толщины материала брикета
4	Температура охлажденного материала брикета после прессования, °С	≤40	≤40

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что способ холодного прессования порошков ПЭО с наполнителями может эффективно использоваться для приготовления полимерных брикетов, которые обладают стабильными физико-химическими свойствами, повышенным полимеросодержанием, а в водных растворах проявляют высокую гидродинамическую активность.

В ходе выполнения настоящей работы были испытаны оба способа временной задержки процесса начала растворения полимерных частиц в воде. В первом случае полимерный порошок пропитывали раствором ПАВ в олеиновой кислоте, а во втором для прессования готовили порошкоподобную смесь полимера с едким натрием.

В качестве примера в табл. 6 приведены составы смесей из которых холодным прессованием получали брикеты (Брикет 1 и Брикет 2).

Таблица 6. Состав и основные свойства брикетов, полученных холодным прессованием смеси тонкодисперсных порошков ПЭО и едкого натрия

№ п/п	Параметры прессования	Условное обозначение	
		Брикет 1	Брикет 2
1	Содержание ПЭО,% вес.	60	80
2	Содержание NaOH,% вес.	40	20
3	Величина давления прессования, кГ/см <sup>2</sup>	40	50
4	Содержание ПЭО,г/см <sup>3</sup>	0,77	1,04

Для получения однородных растворов ПЭО из брикетов был разработан и изготовлен макет проточного генератора полимерных растворов принципиальная схема которого приведена на рис. 1. Макет генератора представляет собой гидроцилиндр с запрессованной в нем смесью тонкодисперсного порошка ПЭО с наполнителем -1, который дополнительно оснащен блоком подачи брикета - 2 на нож-разрыхлитель (фрезу) - 3 с управляемым электроприводом - 4. Разрыхление материала брикета происходит в области течения воды в кавитационном смесителе - 5. Генератор оснащен патрубками 6, 7 для подачи в кавитационный смеситель воды и отвода из него полученного раствора, соответственно[7,19,20].

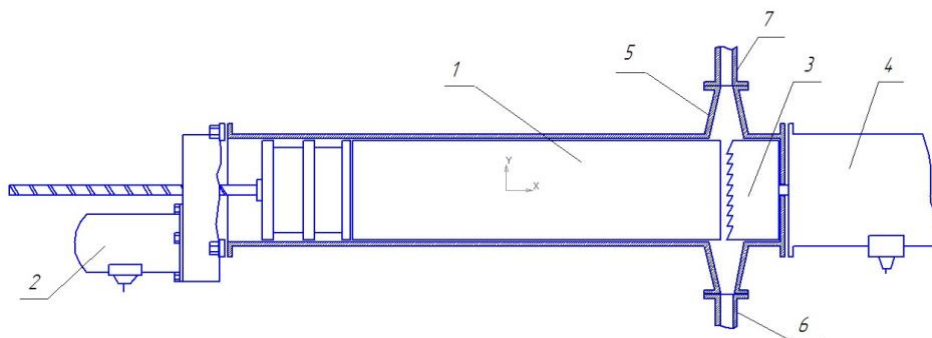


Рис. 1. Принципиальная схема рабочего макета проточного генератора приготовления полимерных растворов из брикетов.

1-гидроцилиндр с полимерным брикетом; 2-электродвигатель с редуктором и поршнем для подачи брикета на нож-разрыхлитель; 3-нож-разрыхлитель (фреза);4-электропривод, обеспечивающий вращение ножа-разрыхлителя; 5-кавитационный смеситель; 6,7-патрубки подачи воды в генератор и отвода из него приготовленного раствора, соответственно.

Скорость вращения фрезы, разрыхляющей брикет, была постоянной и равной 2500 об/мин., а линейная скорость подачи брикета на фрезу изменялась от 0,5 до 1,0 мм/с. Основным преимуществом кавитационного смесителя является высокая степень диспергирования полимерных частиц в воде, высвобожденных из брикета посредством ножа-разрыхлителя.

В процессе выполнения работы [7] использовался макет генератора с кавитационным смесителем, который был спроектирован на расход воды равный  $(0,5 \pm 0,03)$  л/с. При предварительной отработке работоспособности макета генератора было установлено, что оптимальный режим его работы обеспечивается при расходе воды равном 0,52 л/с и давлении на входе кавитационного смесителя 7 кг/см<sup>2</sup>.

**Гидроструйные технологии**[18,21-23]. Эффективность работы гидроимпульсных машин (ГИС), исполнительным (разрушающим) органом которого является импульсная струя жидкости, непосредственно зависит от ее геометрических и гидродинамических параметров. Общепринятым критерием оценки гидродинамических свойств струи и ее структуры является понятие ее компактности, т.е. способность не распадаться и сохранять свою кинетическую энергию на определенном расстоянии от сопла.

На компактность жидкостных струй существенное влияние оказывают турбулентные пульсации внутри струи, приводящие к образованию на ее поверхности неровностей в виде волн и, в конечном итоге, к появлению разрывов в структуре струи и увеличению ее диаметра. Следовательно, воздействуя на процессы турбулентного переноса в струе, можно управлять ее компактностью, что, в конечном итоге, повысит эффективность работы ГИС.

Один из наиболее эффективных способов подавления турбулентности заключается во введении в жидкость гидродинамически-активных микродобавок различной природы, среди которых наиболее эффективными являются водорастворимые полимеры большой молекулярной массы с линейной структурой макромолекул. За счет подавления турбулентности водорастворимые полимеры (полиэтиленоксид, полиакриламид) существенно (на 50-80 %), при очень малых концентрациях (порядка сотой и даже тысячной долей процента по весу), снижают гидродинамическое сопротивление при турбулентном движении воды в трубах. Аналогичное воздействие микродобавки полимеров оказывают и на струйные течения. За счет подавления турбулентности в струе микродобавки полимеров значительно улучшают ее компактность, что в конечном итоге увеличивает длину ее начального участка и дальнобойность. Следствием этого и является увеличение разрушающей силы струи.

В Донецком национальном университете были исследованы разрушающие способности водных струй и струй из растворов ТВПК с использованием углицементного блока с коэффициентом прочности по шкале М.М. Протодьяконова равным 1,6. Начальное расстояние от среза насадки (сопла) до поверхности углицементного блока составляло 0,14 м. Установлено, что если в качестве рабочей жидкости использовать водные растворы композиций на основе ПЭО, то глубина пробиваемого отверстия в 1,5-3,5 раза (в зависимости от продолжительности работы ГИС) больше глубины отверстия, пробиваемого струей воды. Особый интерес представляют результаты эксперимента по разрушению углицементного блока, у которого коэффициент прочности равен 2,5 при увеличенном до 0,22 м. начальном расстоянии от среза сопла до поверхности блока. Этот блок моделирует угольный пласт повышенной прочности. Обработку блока проводили до момента прекращения роста



глубины каждого отверстия. Наибольшая глубина отверстия, пробитого импульсной струей воды, составила 0,22 м, а струей водного раствора ТВПК – 0,71 м[21-24].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что после соответствующей доработки ГИС (с использованием в качестве рабочих жидкостей водных растворов полимерных композиций на основе ПЭО) можно применять для создания в грунте щели с последующим ее заполнением изолирующими материалами – глиняными, гипсовыми растворами или асфальтобитумными эмульсиями.

#### Устройства для растворения и ввода полимерных добавок в трубопроводы.

На основании проведенных исследований установлено, что гидродинамически-активные вещества могут подаваться в трубопровод или рукавную линию в виде однородных концентрированных растворов, жидких и пастообразных композиций, а также с использованием проточных кассет с твердыми водорастворимыми полимерными композициями (покрытиями и брикетами). Принципиальная схема устройства для введения однородных концентрированных растворов гидродинамически-активных полимерных веществ в трубопровод приведена на рис 2[7].

Принцип работы устройства сводится к следующему. В узле растворения 1, представляющем емкость с низкооборотной механической мешалкой (до 900 об/мин.), из жидких или пастообразных композиций заранее приготавливают однородный концентрированный (маточный) раствор содержащий (0,08 – 0,1) вес. % ПЭО или ПАА. После этого, с помощью плунжерного или шестеренчатого насоса 4, раствор закачивают в емкости 2, которые могут использоваться поочередно. С целью исключения окислительной деструкции в процессе приготовления, хранения и использования растворов в емкости 1 и 2 из резервуара 3 подается азот.

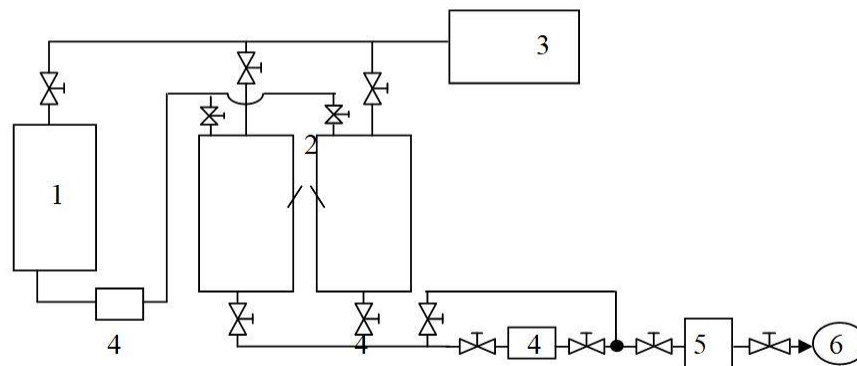


Рис. 2. Устройство для растворения и ввода концентрированных растворов полимеров:  
1 – узел растворения полимерных материалов; 2 – емкости для хранения и подачи полимерных растворов; 3 – резервуар с азотом; 4 – плунжерный или шестеренчатый насос; 5 – индукционный расходомер; 6 – магистральный трубопровод

Подача концентрированного полимерного раствора в трубопровод 6 осуществляется плунжерным или шестеренчатым насосом 4, а расход фиксируется индукционным расходомером 5. Преимущество использования заранее приготовленных растворов гидродинамически-активных полимеров заключается в том, что для их подачи в трубопровод 6 и смешивания с водой нет необходимости устанавливать специальные смесители.

Полимерные суспензии и пасты обладают свойством за малые промежутки времени в специальных генераторах-смесителях образовывать однородные растворы

требуемых концентраций. При этом, они могут использоваться в тех технологических процессах, когда, необходимо подать десятки, сотни и даже тысячи кубических метров полимерных растворов. К сложностям в применении жидких и пастообразных композиций следует отнести необходимость использования специального оборудования и оснастки – узлов для их подачи, дозирования и смешивания с водой.

На рис. 3 приведена принципиальная схема устройства для подачи жидких и пастообразных полимерных композиций в трубопроводы различного назначения. Принцип работы устройства сводится к следующему. Жидкая или пастообразная полимерная композиция из емкости 1 дозировочным плунжерным насосом 2 подается в смеситель 3. Одновременно в смеситель из емкости 5 насосом 4 подается вода. При этом для каждого конкретного случая необходимо рассчитать, в каком соотношении в объемных частях необходимо подавать в смеситель воду и композицию, чтобы получить раствор требуемой концентрации[7].

Приготовленный в смесителе маточный раствор подается в трубопровод 7. Следует отметить, что в связи с тем, что обычно в трубопровод инжектируются растворы гидродинамически-активного вещества с содержанием полимера (0,05-0,1) вес.%, расход воды, подаваемой насосом 4, и расход раствора, подаваемого в трубопровод 7, с достаточной степенью точности можно фиксировать по индукционному расходомеру 6.

Ранее уже отмечалось, что большие перспективы практического применения имеют ультраслабые полимерные покрытия и флоковые покрытия с растворимыми полимерными наполнителями на армирующих вставках, которые размещаются в проточных кассетах и позволяют получать большие количества жидкостей с добавками ПЭО или ПАА без применения специального оборудования.

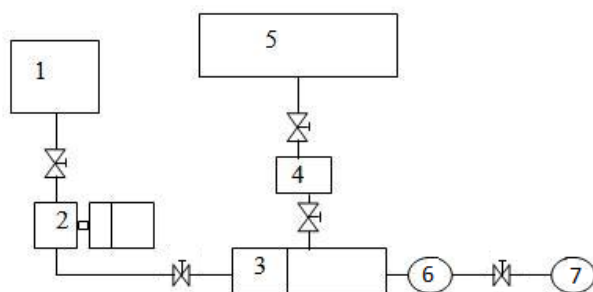


Рис. 3. Принципиальная схема устройства для приготовления однородных высококонцентрированных растворов из жидких полимерных композиций и их дозированного ввода в трубопроводы систем пожаротушения:

- 1 – емкость с жидкой или пастообразной полимерной композицией; 2 – плунжерный дозировочный насос типа НД;  
 3 – смеситель для высоковязких жидкостей; 4 – насос для подачи воды; 5 – емкость для воды;  
 6 – индукционный расходомер; 7 – трубопровод системы канализации, аварийной откачки воды или пожаротушения

С учетом условий формирования потока кассета должна состоять из следующих частей: корпуса, армирующей вставки с полимерным покрытием, рассекателей водного потока и соединительных гаек. Корпус кассеты имеет цилиндрическую форму и изготавливается из коррозионно-стойких материалов. Внутренний диаметр кассеты выбирается таким образом, чтобы после размещения в ней армирующей вставки с

покрытием и турбулизаторов не возникало дополнительного сопротивления потоку жидкости. На концах корпуса кассеты и переходников нарезается резьба для установки на них соединительных головок, обеспечивающих установку кассет в трубопровод или рукавную линию. Вставка, рассекающая водный поток, играет роль турбулизатора, формирующего турбулентное струйное течение. Одновременно, за счет конусности внутренней поверхности, она обеспечивает центровку армирующей вставки с брикетом при сборке кассеты[7].

**Выводы.** 1. Одной из сложных проблем, сдерживающих реализацию технологий локализации токсикантов в литосфере, является приготовление за малые промежутки времени большого количества растворов высокомолекулярных полимеров.

Водорастворимые композиции на основе гидродинамически-активных полиэтиленоксида и полиакриламида (суспензии, пасты, покрытия, брикеты) обеспечивают экспресс-приготовление однородных растворов с максимальным сохранением молекулярной массы полимера.

По своим физико-химическим свойствам растворы из полимерных композиций не отличаются от растворов приготовленных по «классической схеме».

2. На примере экологических проблем пруда-испарителя Кременчугского НПЗ определены места наиболее эффективного применения технологии полимерной локализации нефтепродуктов и фенола под землей. В первую очередь это относится к фильтрующим породам на которых возведена барражная завеса и к обнаруженным в ней «гнездам» песков и супесей с высокими фильтрующими свойствами. Кроме этого предлагаемая технология может эффективно использоваться для уменьшения или полного предотвращения фильтрационных потерь через завесу и дамбы, которые изменили свои первоначальные фильтрационные свойства в сторону увеличения под воздействием высокой минерализации и химического состава сточных вод.

3. Основываясь на результатах опытов приготовления из полимерных композиций растворов со сниженным гидродинамическим сопротивлением турбулентного трения считается целесообразным применять полимерные суспензии и пасты для полимерной локализации токсикантов в литосфере.

4. Использование в качестве рабочей жидкости водных растворов гидродинамически-активного ПЭО существенно повышает эффективность работы гидроимпульсных машин (ГИМ) путем увеличения глубины отверстия, которое пробивается в твердом материале за счет снижения ГСТТ в проточных частях основных узлов и в трубопроводах, а также в результате улучшения геометрических и динамических параметров струи. Полученные результаты указывают на возможность применения таких гидроструйных технологий для создания в грунте щели с последующим её заполнением изолирующими материалами – глиняными, гипсовыми растворами или асфальтобитумными эмульсиями.

5. Использование созданных в ДонНУ водорастворимых полимерных композиций на основе ПЭО и ПАА существенно упрощает реализацию процессов полимерной локализации токсикантов в литосфере и имеет неоспоримые преимущества по сравнению с использованием заранее приготовленных полимерных растворов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погребняк В. Г. Физико-химические основы полимерной локализации токсикантов в литосфере / В. Г. Погребняк, А. А. Шубин. – Донецк : ДонГУЭТ, 2002. – 219 с.
2. Underground disposal facilities for low-level radio-active waste to begin operation in 1992 // STA Today. – 1990. – 2, № 12. – P. 4.

3. Umweltschutz mit Beton. Instandsetzung des Hamburg Mischwassersiel Systems // Beton. – 1991. – № 2. – P. 62.
4. А.с. 215802 СССР, МПК E02B. Способ сооружения профильтрационных элементов гидротехнических сооружений / Кондратьева К. Б., Павчан М. П.
5. А.с. 509688 СССР, МПК E02D 3/12. Способ укрепления грунта / Мхитарян В. В., Сошнов А. А., Каинсон А. Я. и др.
6. Бабаев М. В. Оценка экологической эффективности барражной (водонепроницаемой) завесы вокруг пруда-испарителя Кременчугского НПЗ / М. В. Бабаев, Н. В. Беседин, Г. А. Демехин // Оценка техногенного воздействия на природную среду. Новые технологии очистки промвыбросов, возвратных вод, переработки и утилизации отходов : сб. науч. тр. – Кременчу, 1996. – С. 35-38.
7. Симоненко А. П. Гидродинамически-активные композиции на основе полимеров и поверхностно-активных веществ для решения проблем экологической безопасности и энергосбережения : дис. на соиск. науч. степ. д-ра техн. наук : 21.06.01 / Симоненко Александр Петрович ; Донецкий нац. ун-т. – Донецк, 2013. – 408 л.
8. Ступин А. Б. Гидродинамически-активные композиции в энергосбережении и экологии / А. Б. Ступин, А. П. Симоненко, П. В. Асланов. – Донецк : ДонГУ, 1999. – 228 с.
9. Гидродинамически-активные полимерные композиции в пожаротушении : монография / А. Б.Ступин [и др.]. – Донецк : ДонНУ, 2001. – 198 с.
10. Висококонцентрована суспензія поліетиленоксиду і перспективи її практичного застосування в енергозбереженні й екології / О. П.Симоненко [та ін.] // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2012. – № 742 : Теорія і практика будівництва. – С. 191-197.
11. Технология приготовления быстрорастворимого полиетиленоксида / А. П. Симоненко [и др.] // Повховские научные чтения : сб. тр. второго междунар. науч.-практ. семинара / под общ. ред. Ступина А. Б. – Донецк, 2012. – С. 86-91.
12. Симоненко О. П. Патент України на корисну модель №91060 МПК (2014.01) CO8L 71 00 Спосіб приготування висококонцентрованої суспензії поліетиленоксиду / О. П. Симоненко, П. В. Асланов, О. Ю. Собко. – Заявл. 22.11.2013 г. – Опубл. 25.06.2014, Бюл. № 12.
13. Симоненко А. П. Повышение эффективности работы мобильных установок аварийной откачки воды добавками гидродинамически-активных полимерных композиций / А. П. Симоненко // Вісник НУВПП. Серія «Технічні науки». – 2012. – Вип. 1 (57). – С. 41-47.
14. Быковская Н. В. Повышение эффективности работы систем аварийного водоотлива и канализации / Н. В. Быковская, А. Б. Ступин, А. П. Симоненко // Вісник Донецького університету. Серія А : Природничі науки. – 2004. – Вип. 1, ч.1. – С. 475-480
15. Application of Hydrodynamically Active Polymeric Dopants and Surfactants to Energy Saving Technologies / A. B. Stupin [et al.] // International Journal of Fluid Mechanics Research. – 2004. – Vol. 31, No. 1. – P. 74-86.
16. Симоненко О. П. Перспективи застосування флокового покриття з водорозчинними полімерними наповнювачами в енергозбереженні й екології / О. П.Симоненко // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2012. – № 726 : Хімія, технологія речовин та їх застосування. – С. 252-257.
17. Применение флокового покрытия с водорастворимыми полимерными наполнителями в энергосбережении и экологии / А. П. Симоненко [и др.] // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Серія : Інженерні системи та техногенна безпека. – Макіївка, 2012. – № 2 (94). – С. 15-19.
18. Повышение разрушающей способности импульсных струй путем применения гидродинамически-активных веществ / А. Б.Ступин [и др.] // Теоретическая и прикладная механика : науч.-техн. сб. – Харьков, 1995. – Вып. 25. – С. 126-130.
19. Симоненко А. П. Водорастворимые брикеты на основе высокомолекулярного полиетиленоксида и перспективы их практического применения в энергосбережении и экологии / А. П.Симоненко // Збірник наукових праць СНУАЕтаП. Екологічна безпека. – Севастополь, 2012. – Вип. 3 (43). – С. 100-108.
20. Симоненко А. П. Перспективы практического применения эффекта Томса в гидравлических системах при чрезвычайных ситуациях / А. П.Симоненко // Збірник наукових праць СНУАЕтаП. Екологічна безпека. – Севастополь, 2012. – Вип. 4 (44). – С. 232-241.
21. Повышение разрушающего действия импульсных струй путем применения гидродинамически-активных добавок / А. Б. Ступин [и др.] // Гидроаэромеханика в инженерной практике : II Респ. науч.-техн. конф. : тез. докл. (27-30 мая). – Киев ; Черкассы, 1997. – С. 54-55.

22. Повышение эффективности гидроструйной резки конструкционных материалов / А. Б. Ступин [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : междунар. сб. науч. тр. – Донецк, 1998. – Вып. 6, т. 3. – С. 145-148.
23. Повышение эффективности работы гидроструйного оборудования путем применения гидродинамически-активных добавок / А. Б. Ступин [и др.] // Пути развития горноспасательного дела : тр. науч.-практ. конф. (Донецк, 21-23 окт. 1997 г.). – Донецк, 1997. – Доп. вып. – С. 6-9.
24. Симоненко А. П. Перспективы практического применения гидродинамически-активных добавок в гидравлических системах при чрезвычайных ситуациях /А. П. Симоненко, П. В. Асланов, Н. А. Дмитренко // Экология и защита окружающей среды : сб. тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., 19-20 марта 2014 г. / под ред. Грицук А. Е. – Минск, 2014 – С. 309-313.

*Поступила в редакцию 18.10.2018 г.*

### PROSPECTS OF THE PRACTICAL APPLICATION OF HYDRODYNAMICALLY ACTIVE COMPOSITIONS FOR POLYMER LOCALIZATION OF TOXICANTS IN THE LITHOSPHERE

*A.P. Simonenko, I.A. Artemova*

The use of water-soluble compositions based on hydrodynamically-active polymers created and improved at Donetsk National University greatly simplifies the practical implementation of polymer localization of toxicants in the lithosphere.

In this article, special attention is paid to the properties of water-soluble compositions created on the basis of high molecular weight polyethylene oxide and polyacrylamide (suspensions, pastes, coatings, briquettes), which using special generators provide homogeneous solutions for short periods of time with maximum preservation of the molecular weight of the polymers.

Based on the results of the environmental performance evaluation of the barrage (waterproof) curtain around the evaporation pond of the Kremenchug Oil Refinery, conducted by experts of the Ukrainian Scientific Center for Water Protection and JSC Ukrnafta, the most efficient use of polymer localization technology for petroleum and phenol underground has been identified.

**Keywords:** hydrodynamic-active compositions, polyethylene oxide, polyacrylamide, solution preparation generators, toxicants, lithosphere, polymer localization.

#### **Симоненко Александр Петрович**

доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.  
E-Mail: sap2012@rambler.ru

#### **Simonenko Aleksandr**

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Professor at Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

#### **Артемova Ирина Александровна**

аспирантка кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха; ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.  
E-mail: artyonova\_i@mail.ru

#### **Artemova Irina**

postgraduate student at Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

## 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](mailto:vestnik.donnu.g@donnu.ru) высылается электронный вариант с полным текстом статьи в формате doc или docx. При отсутствии возможности предоставления в редколлегию рукописи, на электронную почту редакции высылается полный текст статьи в формате pdf. Рукописи, не соответствующие редакционным требованиям, и статьи, не соответствующие тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Редакция оставляет за собой право проводить редакционную правку рукописей. Корректур статей авторам не высылается.

3. Обязательные требования к оформлению статей:

- **Размер бумаги:** А4.
- **Ориентация:** книжная.
- **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
- **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 *инициалы и фамилия(и) автора(ов)* – полужирный, курсив, выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через две строки:** аннотация объемом до 100 слов, кратко отражающая предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами.
- **На следующей строке:** словосочетание *Ключевые слова:* – полужирный, курсив. Далее приводятся ключевые слова количеством до 10 слов, отделяемых друг от друга запятой либо точкой с запятой. Аннотацию и ключевые слова рекомендуется отделять с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание, например, постановка задачи, методы ее решения, анализ полученных результатов. В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ** – полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее со следующей строки приводится нумерованный перечень используемых литературных источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание» и ГОСТ 7.05-2008 «Библиографическая ссылка». Ссылка на источник приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо включение в список литературы источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** надпись *Поступила в редакцию xx.xx.20xx г.* размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, *инициалы и фамилия(и) автора(ов)*, аннотация, *ключевые слова* на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языке) указываются сведения об авторах:
  - **Фамилия, имя, отчество;**
  - ученая степень и звание, должность, с указанием организации (полное название, в именительном падеже), которую представляет автор;
  - страна, город;
  - адрес электронной почты.

5. Образец оформления статьи:

УДК 537.86

## ФУНКЦИИ СЛОЖНОСТИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ УЧАСТКОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ

© 2017 *И.А. Третьяков, В.В. Данилов*

---

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

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

---

**Введение.** При проведении исследований различных физических явлений...

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

**Этап сегментации.** Сегментация экспериментальных кривых или...

**Выводы.** В данной работе рассмотрена методика ...

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

*Поступила в редакцию xx.xx.20xx г.*

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

*Tretiakov I., Danilov V.*

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

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

#### **Третьяков Игорь Александрович**

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

#### **Tretiakov Igor**

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

#### **Данилов Владимир Васильевич**

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

#### **Danilov Vladimir**

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



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

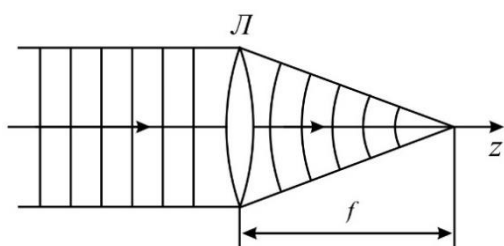


Рис. 4. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F<sub>3</sub>

Элемент	Номинал	Единица измерения
C <sub>out</sub>	25	пФ
C <sub>1</sub>	10	нФ
C <sub>2</sub>	100	мкФ
L <sub>1</sub>	150	мкГн
L <sub>2</sub>	460	нГн
L <sub>3</sub>	765	нГн
R <sub>1</sub>	39	кОм

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

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

Образец оформления формулы:

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

8. Материалы предоставляются по адресу:

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

**Главный редактор:** Белоусов Вячеслав Владимирович, каб. 252.

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

**Ответственный секретарь:** Третьяков Игорь Александрович, каб 210.

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

**E-mail:** [vestnik.donnu.g@donnu.ru](mailto:vestnik.donnu.g@donnu.ru)

*Научное издание*

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

**2018. – № 3**

Технический редактор: И.А. Третьяков

---

Адрес редакции:  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,  
ул. Университетская, 24,  
283001, г. Донецк  
Тел.: +38 (062) 302 07 81, +38 (062) 302 92 88  
E-mail: [vestnik.donnu.g@donnu.ru](mailto:vestnik.donnu.g@donnu.ru)  
URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

---

Подписано в печать 28.12.2018 г.  
Формат 60×84/8. Бумага офсетная.  
Печать – цифровая. Усл. печ. л. 11,08  
Тираж 100 экз. Заказ. №

Издательство ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»  
283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24.  
Тел.: +38 (062) 302 92 27.  
Свидетельство о внесении субъекта издательской деятельности  
в Государственный реестр  
серия ДК № 1854 от 24.06.2004 г.