

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

# Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ  
ЖУРНАЛ

*Основан  
в 1997 году*

---

---

Серия Г  
Технические  
науки

---

---

3/2019

---

---

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Печатается по решению Ученого совета ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»  
Протокол №9 от 29.11.2019 г.*

# Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Номер посвящён 110-летию со дня рождения выдающегося учёного, члена-корреспондента АН УССР, профессора, доктора технических наук, заслуженного деятеля науки и техники Ивана Лукича Повха

Серия Г: Технические науки

№ 3

Донецк 2019

---

## СОДЕРЖАНИЕ

---

Вступительное слово	3
<b>ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ</b>	
<i>Болонов Н.И., Силенко Е.М., Силенко С.Е., Силенко В.Е.</i> Прикладные аспекты явления перемежаемости	4
<b>РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ</b>	
<i>Иванов И.М., Курушин А.А.</i> Борьба с беспилотниками с помощью концентрации энергии электромагнитного поля	14
<b>ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ</b>	
<i>Шарий Т.В.</i> Об особенностях реализации цифровых линейных фильтров на платформах .NET FRAMEWORK и .NET CORE	20
<i>Третьяков И.А.</i> Исследование алгоритмов лингвистического описания участков экспериментальных кривых	26
<i>Данилов В.В., Тимченко В.И., Гмыря В.А.</i> Оптические информационные технологии. Прохождение носителя информации через передающие среды	31
<i>Павловская К.А.</i> Анализ моделей прогноза зон покрытия сетей сотовой связи пятого поколения	38
<b>ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА</b>	
<i>Kovalenko A.A., Gusentsova Y.A., Pilavov M.V.</i> Thixotropy of coal water slurry	44
<b>ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА</b>	
<i>Горожанкин С.А., Савенков Н.В.</i> Рекуперация механической энергии в силовых агрегатах городских автобусов	52
<i>Золотарёва И.А., Симоненко А.П., Гучмазова Т.К.</i> Влияние температуры на величину снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения в растворах ВМП и МПАВ	58
<i>Зибольд А.Ф.</i> Крымский ученый-лесовод Ф. И. Зибольд и его конденсатор водяных паров	65
110-летию со дня рождения И. Л. Повха	75
Правила для авторов	79

# Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997

Number dedicated to the 110th birthday of the outstanding scientist, corresponding member of the Academy of Sciences of the USSR, professor, doctor of technical sciences, honored worker of science and technology Ivan Lukich Povkh

Series G: Technical science

No 3

Donetsk 2019

---

## CONTENTS

---

Opening remark	3
<b>INSTRUMENT ENGINEERING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS</b>	
<i>Bolonov N.I., Silenko E.M., Silenko S.E., Silenko V.E.</i> Applied aspects of the phenomenon of intermittent	4
<b>RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION</b>	
<i>Ivanov I.M., Kurushin A.A.</i> Fighting drones with concentration of electromagnetic fields	14
<b>COMPUTER SCIENCE AND COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT</b>	
<i>Sharii T.V.</i> On specifics of digital linear filters realization on .NET FRAMEWORK and .NET CORE platforms	20
<i>Tretiakov I.A.</i> Analysis of algorithms for linguistic description of the experimental curve sites	26
<i>Danilov V.V., Timchenko V.I., Gmyrya V.A.</i> Optical information technologies. The passage of the media through the transmission medium	31
<i>Pavlovskaya K.A.</i> Analysis of forecast models for coverage areas of fifth generation cellular networks	38
<b>INDUSTRIAL HEAT AND POWER ENGINEERING</b>	
<i>Kovalenko A.A., Gusentsova Y.A., Pilavov M.V.</i> Thixotropy of coal water slurry	44
<b>ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN SERVICES</b>	
<i>Gorozhankin S.A., Savenkov N.V.</i> Recovery of the mechanical energy in the power units of the urban buses	52
<i>Zolotaryova I.A., Simonenko A.P., Guchmazova T.K.</i> The influence of the temperature on the reduction of the hydrodynamic resistance of turbulent friction in solutions of HMWP and MFS	58
<i>Zibold A.F.</i> Crimean forest scientist F. I. Zibold and his water steams condenser	65
To the 110th birthday of the I. L. Povkh	75
Instructions for authors	79



## Уважаемые коллеги!

Журнал «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» расширяет географию своих авторов. Авторы статей нашего журнала являются представителями следующих организаций Донецкой Народной Республики: ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского», а также ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (Российская Федерация), ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"» (Российская Федерация), ГОУ ВО МО «Государственный гуманитарно-технологический университет» (Российская Федерация), РГП «Кошкентауский государственный университет имени Ш. Уалиханова» (Республика Казахстан) и ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Владимира Даля» (Луганская Народная Республика).

Надеемся и дальше расширять географию наших авторов. Также обращаем Ваше внимание, что 3 и 4 номера нашего журнала 2019 года будут посвящены выдающемуся учёному, члену-корреспонденту АН УССР, профессору, доктору технических наук, заслуженному деятелю науки и техники Ивану Лукичу Повху.

Главный редактор



В.В. Белоусов

Зам. главного редактора



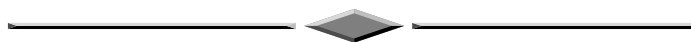
В.В. Данилов

Ответственный секретарь



И.А. Третьяков

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



УДК 532.5.011

П Р И К Л А Д Н Ы Е А С П Е К Т Ы Я В Л Е Н И Я П Е Р Е М Е Ж А Е М О С Т И

© 2019 Н.И. Болонов, Е.М. Силенко, С.Е. Силенко, В.Е. Силенко

Предложен алгоритм распознавания, позволяющий уменьшить неопределенность вычисления функции перемежаемости в процессе исследования океанической перемежаемости и эволюции турбулентного кильватерного следа надводного корабля в естественно турбулизированной среде – верхнем перемешанном слое моря с помощью самодвижущегося автономного подводного аппарата, реализующего идею траекторно-управляемого обследования гидрофизических полей. Полученные в натуральных экспериментах результаты свидетельствуют о возможности управления подводным аппаратом по искусственно созданным турбулентным возмущениям.

**Ключевые слова:** турбулентность, алгоритм распознавания, функция перемежаемости, автономный подводный аппарат, турбулентный кильватерный след, надводный корабль, пульсации скорости, первичный измерительный преобразователь.

**Введение.** Перемежаемость в турбулентных течениях представляет собой чередование в поле турбулентных пульсаций областей с отличающимися статистическими свойствами. Примером может служить перемежаемость, вызванная движением внешней границы турбулентности, океаническая перемежаемость. Вертикальная и горизонтальная структура морских гидрофизических полей характеризуется пятнами, слоями, внутри которых локализуется мелкомасштабное перемешивание. Поэтому зондирование таких полей приводит к перемежаемости получаемых данных. Причины ее возникновения самые различные, но во многих практически важных случаях она может быть описана моделью предложенной Коважным [1] в виде:

$$X(t) = I(t)X_1(t) + [1 - I(t)]X_2(t), \quad (1)$$

где  $X_1(t)$ ,  $X_2(t)$  – данные чередующихся структур – случайные процессы;  $I(t)$  – ноль-единичная случайная функция перемежаемости, которая равна единице, если в момент времени в исследуемой точке течения движение подчиняется статистике  $X_1(t)$  и равна нулю – если реализуется статистика  $X_2(t)$ .

Подавляющее число публикуемых работ по экспериментальному исследованию перемежаемости посвящено измерению этой функции и ее статистических характеристик.

Несовпадение статистических данных, полученных разными авторами при исследовании перемежаемости, обусловлено погрешностями измерения функции перемежаемости. К настоящему времени предложены ряд способов и устройств измерения функции перемежаемости точность которых в сильной степени зависит от устанавливаемых при измерении параметров [2, 3]. Снижение уровня погрешности

возможно в процессе оптимизации значений установочных параметров измерителей функции перемежаемости – порогов классификации. Согласно теории классификации [4], нахождение этих оптимальных значений сводится к процедурам обучения или самообучения классификаторов, обеспечивающие минимум ошибок измерения функции перемежаемости.

Метод самообучения классификаторов по сигналу перемежаемой турбулентности, предложенный в ряде опубликованных работ, выполненных в разное время в Донецком университете и СКТБ «Турбулентность» [2, 5], имеет лучшие качественные характеристики по отношению к известным методам, где величины пороговых параметров в процессе классификации определялись эмпирически. Такой подход не имеет общности и не раскрывает сущности процесса классификации, что затрудняет оценку достоверности измерений функции перемежаемости.

Эффективность процедур обучения или самообучения классификаторов подтверждена тестовыми испытаниями как на имитаторах перемежаемого сигнала – метод статистических испытаний Монте-Карло [6, 7], так и в ходе натуральных и лабораторных экспериментов на реальных физических течениях.

**Основная часть.** Реальным физическим течением, реализованным в лабораторном эксперименте, являлся турбулентный след за цилиндром [8]. Исследование перемежаемости турбулентного следа представляет большой интерес, так как по структуре его границы можно судить о динамике крупных вихрей в следе.

Результаты обработки перемежаемого сигнала турбулентного следа за цилиндром в стратифицированном потоке позволили установить ряд важных физических свойств и параметров турбулентности, в частности, геометрию крупных вихрей и их деформацию. Эти эксперименты проводились на созданном в Донецком университете гидродинамическом стенде, позволяющем получать многослойный стратифицированный поток. Подробно стенд и сам эксперимент описаны в [8, 9].

**Натурный эксперимент** проводился в акватории Черного моря и предусматривал измерение естественной, фоновой турбулентности и исследование эволюции турбулентного кильватерного следа (ТКС) надводного корабля (НК) в естественно турбулизированной среде – верхнем перемешанном слое моря с помощью самодвижущегося автономного подводного аппарата (АПА), реализующего идею траекторно-управляемого обследования гидрофизических полей.

В методическом отношении схема проведения гидрофизических измерений по разрезам с помощью автономных подводных аппаратов хорошо согласуется с общепринятыми в океанографии методами, которые отработаны и используются в практических экспериментах. Кроме того, при изучении мелкомасштабной турбулентности, подводные аппараты позволяют обеспечить детальность съемки и точность ее привязки недоступные для существующих средств [10]. Широкий диапазон скоростей подводных аппаратов позволяет при этом использовать гипотезу «замороженной турбулентности» для пересчета временных характеристик в пространственные.

Турбулентный кильватерный след надводного корабля представляет собой вытянутую в продольном направлении область турбулентных возмущений вырождающуюся во времени, расположенную вблизи свободной поверхности, возникшую в пограничном слое корпуса корабля и лопастей гребных винтов, а также в области смешения струй гребных винтов.

Начальная интенсивность кильватерного следа определяется параметрами НК – скоростью хода, водоизмещением, мощностью главной энергетической установки.

По мере развития кильватерного следа все его характеристики начинают зависеть от параметров водной среды, естественной турбулентности. При этом, роль параметров водной среды с удалением от НК все более существенна.

Поле ТКС НК к настоящему времени не имеет математического описания, поэтому результаты, полученные при экспериментальном исследовании становятся единственным источником параметров ТКС НК. Всесторонний анализ экспериментальных данных является эффективным средством для построения гидродинамической модели ТКС НК.

В лабораторных условиях невозможно смоделировать турбулентный спутный след подводных и надводных движущихся объектов, сгенерированным при больших числах Рейнольдса, проследить его развитие и вырождение вплоть до диссипации турбулентной энергии в условиях естественно турбулизированной среды.

Кроме научной направленности **натурный эксперимент** предусматривал и решение прикладной задачи – исследование возможности управления самодвижущимся АПА по искусственно созданным турбулентным возмущениям, аналогом которых в настоящем эксперименте и является ТКС НК.

Реализация такого управления позволит дать ответ на вопрос о возможности создания систем обнаружения и наведения АПА на источник турбулентных возмущений, в данном случае, движущийся надводный корабль [11].

Используемый АПА представлял собой управляемую торпеду-лабораторию и имел типичную для торпед конструкцию – два соосных гребных винта и кормовое оперение с вертикальными и горизонтальными рулями. Источником питания используемой торпеды-лаборатории служила аккумуляторная батарея.

При исследовании эволюции ТКС НК торпеды-лаборатория управлялась согласно Программе, алгоритм которой и состав используемого комплекса аппаратуры определялись целью конкретного запуска.

Согласно Программе, траектория движения торпеды-лаборатории должна проходить вдоль ТКС с попеременным входом и выходом из него – траектория «Змейка», рис.1. Таким образом организовывался сигнал представленный моделью Коважного (1) – фоновая естественная турбулентность – статистика  $X_2(t)$ , движение в следе – статистика  $X_1(t)$ . Анализ физических процессов, происходящих при образовании и развитии ТКС НК показывает, что в большинстве случаев первичным является динамическое поле пульсации скорости, которое во многом определяет все характеристики спутного течения. В этой связи, бортовой комплекс аппаратуры включал в себя информационно-измерительный блок, формирующий представление о внешней среде – первичный измерительный преобразователь пульсаций скорости [12, 13] и систему управления, которая воспринимает, обрабатывает полученную информацию и выдает управляющие команды исполнительным блокам торпеды-лаборатории [14].

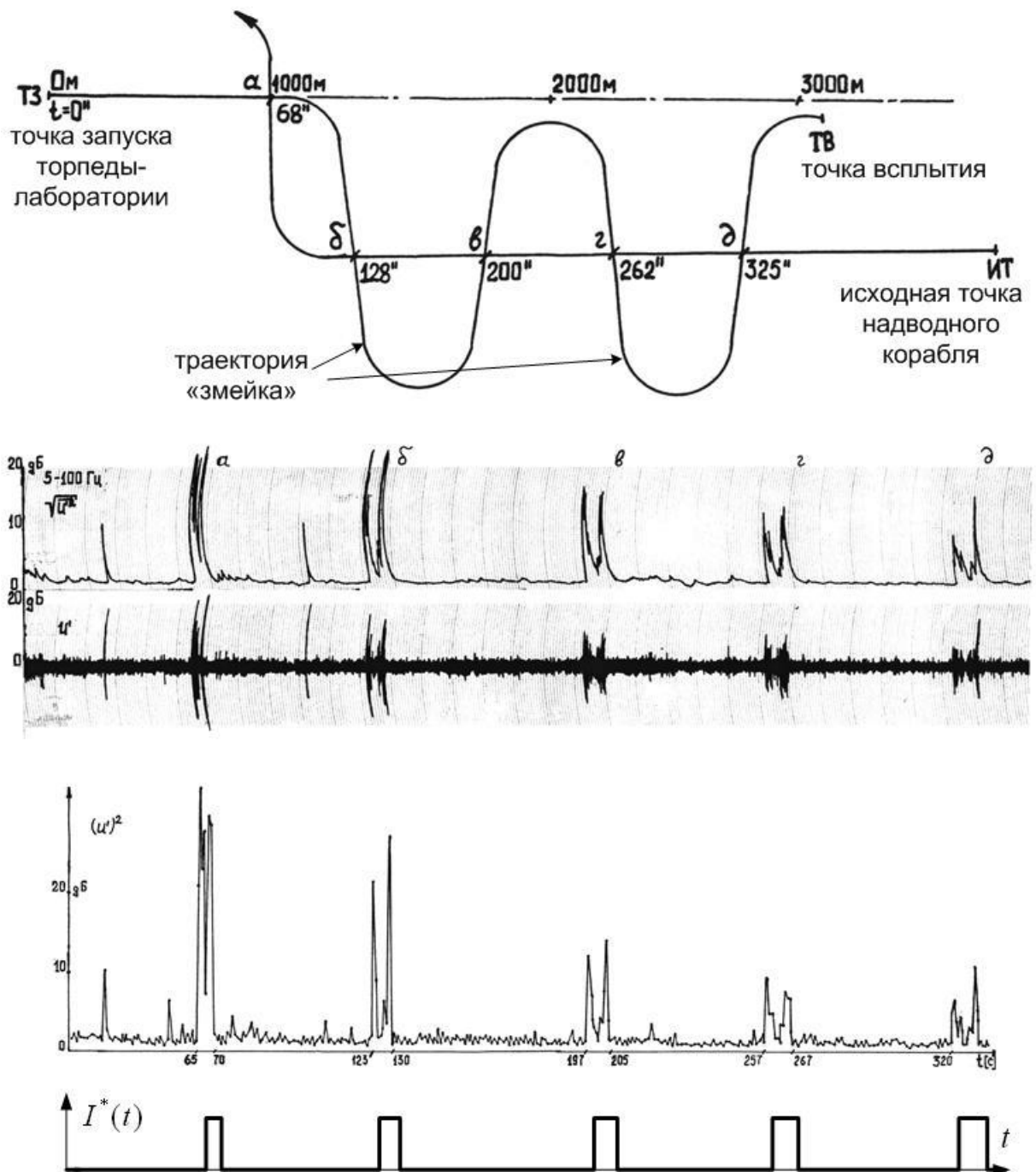


Рис. 1. Траектория «Змейка»

Использование полученной текущей информации определяется эффективностью достижения целевого назначения процесса управления АПА, которое заключается в общем случае, в обнаружении и наведении на источник турбулентных возмущений – движущийся НК. При этом, допустимы, в отличие от чисто измерительных систем, любые искажения исходных входных сигналов, их нелинейные и функциональные преобразования, если они ведут к повышению качества управления.

Для увеличения разделимости статистик перемежаемого сигнала  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$  осуществлялось преобразование исходного сигнала пульсаций скорости – дифференцирование, фильтрация, а для устранения выборочной изменчивости производилось квадрирование и сглаживание на соответствующем малом интервале времени [15, 16].

Задача классификации требует для своего решения выявления отличительных признаков ТКС в условиях нестационарности естественной фоновой турбулентности, связанной с изменяющимися гидрологическими условиями или, возможной нестабильностью хода торпеды-лаборатории по глубине при движении ее на малых глубинах, в верхнем перемешанном слое моря.

Такие отличительные признаки использованы в алгоритме принятия решения о принадлежности сигнала к одной из структур  $X_1(t)$  или  $X_2(t)$

$$I^*(t) = [x_n(t) \geq C] \vee \{ [x_n(t) < C] \wedge (\Delta t_{np_i} \leq \tau_{np}) \}. \quad (2)$$

При этом оценка  $I^*(t)$  должна удовлетворять на временно-пространственном интервале условию  $I^*(t) \geq \tau_s$ . Здесь  $\Delta t_{np_i}$  – длительность провалов сигнала  $x_n(t)$  на уровне  $C$ ;  $C$ ,  $\tau_{np}$  и  $\tau_s$  – пороговые установки классификатора;  $\vee$ ,  $\wedge$  – операции логического суммирования и умножения.

Параметр  $\tau_{np}$  в этом случае может интерпретироваться как параметр, не позволяющий классификатору менять решение в течение времени меньшего  $\tau_{np}$ . Преимущество такого алгоритма заключается в том, что время удержания решения постоянно и равно  $\tau_{np}$ . Поскольку распределение длительностей провалов  $\Delta t_{np_i}$  может быть оценено применением хорошо разработанной теории выбросов, возможно аналитическое определение уровней ошибок классификации, обусловленных ложными провалами [2, 17].

Использование таких установочных параметров повышает вероятность правильного распознавания ТКС на фоне естественной турбулентности морской среды и уменьшает время принятия решения о наличии следа [14].

По ходу движения торпеды-лаборатории осуществлялась классификация зон повышенных значений пульсация скорости по устанавливаемому пороговому уровню  $C$ , по протяженности этих зон –  $\tau_s$  и разрывам в них –  $\tau_{np}$  на уровне установленного порогового значения –  $C$ . Таким образом, классификатор при принятии решения о нахождении в следе или вне его учитывает внутреннюю структуру (разрывы) зон повышенной турбулентности и протяженность этих зон – дополнительный установочный параметр в алгоритме (2), основанный на априори известном физическом представлении о таком типе течения. Для получения реальной функции перемежаемости  $I(t)$  необходимо оценку  $I^*(t)$  скорректировать на величину  $\tau_k = \tau_s - \tau_{np}$ . Диаграммы, поясняющие работу классифицирующего устройства, представлены на рис.2.

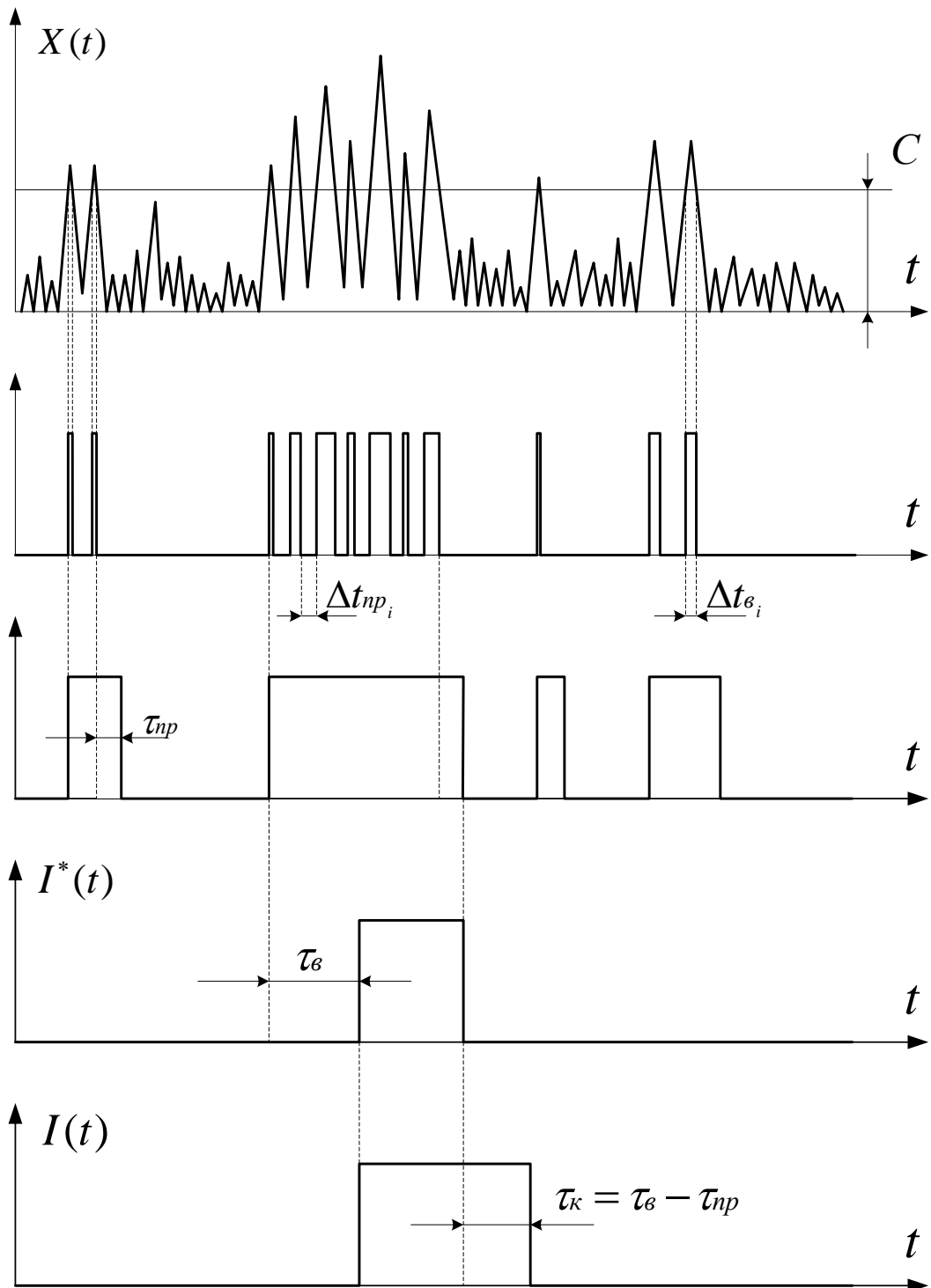


Рис. 2. Диаграммы, поясняющие работу классифицирующего устройства

Анализ турбулентных пульсаций скорости в процессе получения информации для выработки решений о принадлежности сигнала к той или иной статистике определяет ряд условий, накладываемых на используемый матаппарат, способы подготовки и

оценки исходных данных, технические принципы построения классификаторов. К их числу относится ограниченное время принятия решений, которое должно учитывать как динамические характеристики первичных измерительных преобразователей, АПА, так и особенности турбулентного сигнала. Для получения статистически достоверных оценок, зачастую при ограниченном объеме измерений, срабатывания классификатора должны быть инвариантны к изменению фонового – сигнала естественной турбулентности и исходного – турбулентного сигнала спутного следа.

Натурный эксперимент проводится при различных, не всегда контролируемых гидрологических условиях, меняющихся не только от эксперимента к эксперименту, но и в процессе одного эксперимента.

Входящее в комплекс бортовой аппаратуры самообучающееся устройство нормализации позволяет устанавливать пороговое значение пульсаций скорости в турбулентном кильватерном следе (статистика  $X_1(t)$ ) в зависимости от уровня естественной турбулентности (статистика  $X_2(t)$ ). Первоначальные оценки и настройка порога осуществлялась с целью нормировки по уровню естественной турбулентности в конкретных гидрофизических условиях без выдачи управляющих команд исполнительным блокам торпеды-лаборатории на начальном этапе движения по программной траектории, с возможной последующей подстроечной корректировкой, – управление устройством нормализации осуществлялось по заднему фронту оценки функции перемежаемости.

**Результаты.** На рис.1 представлены диаграммы записи в реальном времени по траектории движения торпеды-лаборатории исходного сигнала – мгновенных значений пульсаций скорости –  $u'$  и после преобразования (полосовая фильтрация, квадрирование, сглаживание) –  $\overline{(u')^2}$ , по которому осуществлялась текущая классификация.

Запуск торпеды-лаборатории производился после прохода корабля по заданной траектории, рис.1. После каждого пересечения следа по заднему фронту оценки функции перемежаемости  $I^*(t)$ , поступала управляющая команда на разворот и последующий вход в турбулентный кильватерный след.

Полученные в натуральных экспериментах данные, свидетельствуют о принципиальной возможности использования гидродинамического поля пульсаций скорости для создания системы самонаведения. Этот факт подкреплен серией испытаний. В качестве примера на рис.3 представлены диаграммы записей сигнала пересечения ТКС НК, позволяющие сделать такой вывод. В условиях морского волнения 4 балла зарегистрирован ТКС НК до расстояния  $X = 950D_0$ , где  $D_0$  – ширина корпуса корабля на уровне ватерлинии. Дальность обнаружения следа зависит от фоновой турбулентности в верхнем перемешанном слое и, вытекающий отсюда необходимости проводить специальные гидрофизические наблюдения этого процесса.



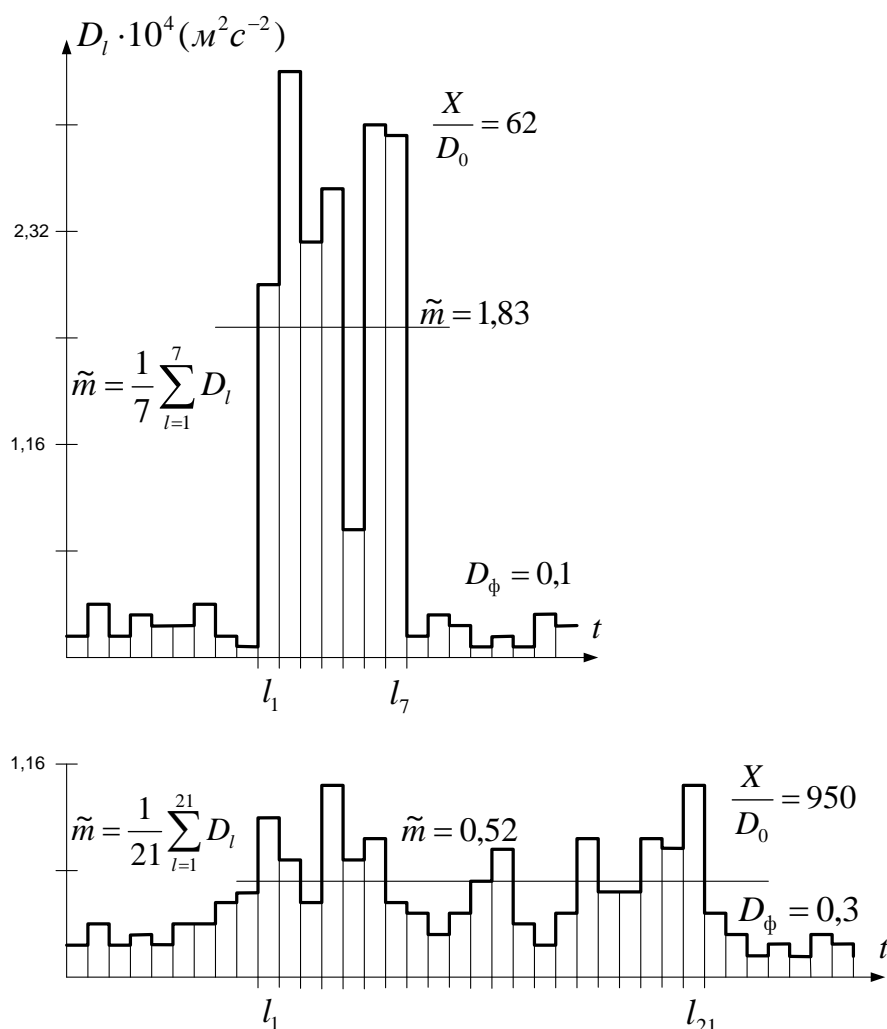


Рис. 3. Диаграммы записей сигнала пересечения ТКС НК

**Выводы.** Предложен алгоритм распознавания, позволяющий уменьшить неопределенность вычисления функции перемежаемости, учитывающий нестационарность статистических характеристик на траектории зондирования. Использование установочных параметров по которым осуществляется классификация зон повышенных значений пульсаций скорости – пороговый уровень, протяженность этих зон и разрывы в них на уровне установленного порогового значения повышает вероятность правильного распознавания ТКС на фоне естественной турбулентности морской среды и уменьшает время принятия решения о наличии следа.

По результатам натуральных экспериментов исследования эволюции ТКС НК получены эмпирические зависимости горизонтального (поперечного) размера и интенсивности турбулентности, которые были использованы ведущими отраслевыми научно-исследовательскими институтами для построения гидродинамической модели ТКС НК.

Экспериментальные данные, полученные, в основном, при волнении моря 2-4 балла, свидетельствуют о принципиальной возможности использования

гидродинамического поля пульсаций скорости ТКС НК для создания системы обнаружения и наведения торпеды на движущуюся цель – надводный корабль.

Все стадии исследований, анализ и интерпретация экспериментальных результатов проводились под непосредственным руководством И.Л. Повха с деятельным участием доц. А.Д. Тищенко.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kovasznay L. S. Large-scale motion in the intermittent region of a turbulent boundary layer / L. S. Kovasznay, V. Kibens, R. F. Blackwelder // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1970. – Vol. 41, Issue 2. – P. 283-325
2. Методы изучения явления перемежаемости / И. Л. Повх, А. Д. Тищенко, Г. М. Агафонов, Н. Т. Киреев // *Механика турбулентных потоков : труды конференции / редкол. : В. В. Струминский (отв. ред.) и др.* – Москва : Наука, 1980. – С. 238-247.
3. Силенко Е. М. Сравнительный анализ измерителей функции перемежаемости / Е. М. Силенко, А. К. Скрьльников, А. Д. Тищенко // *Проблемы гидромеханики в освоении океана : материалы III респ. конф. по прикладной гидромеханике. Ч. I.* – Киев : Наукова думка, 1984. – С. 88-89.
4. Миленский А. В. Классификация сигналов в условиях неопределенности / А. В. Миленский. – Москва : Советское радио, 1975. – 328 с.
5. Повх И. Л. Параметрическая адаптация алгоритма обработки данных перемежаемости / И. Л. Повх, А. Д. Тищенко, Н. Т. Киреев // *Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности : [тез. докл.] IV Всесоюз. совещания.* – Новосибирск : ИТ СО АН СССР, 1981. – С. 11-13.
6. Тищенко А. Д. Индикаторное поле неоднородностей морской турбулентности и их выделение по методу кластерграмм / А. Д. Тищенко // *Физическая гидродинамика : сб. науч. тр. / отв. ред. И. Л. Повх.* – Донецк : ДонГУ, 1990. – С. 63-71.
7. Исследование на ЭВМ перемежаемости следа за цилиндром в температурностратифицированном потоке адаптивным алгоритмом / И. Л. Повх, Н. И. Болонов, В. Г. Лобачев и др. // *Струйные течения жидкостей и газов : тез. Всесоюз. науч. конф. (2-5 июня, 1982 г.).* – Новополюк, 1982. – Ч. 1. – С. 30-37.
8. Экспериментальное исследование перемежаемой турбулентности в следе за цилиндром с помощью адаптивных алгоритмов / Н. И. Болонов, Е. Д. Пометун, Е. М. Силенко и др. // *Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки.* – 2018. – № 2. – С. 3-8.
9. Болонов Н. И. Гидродинамическая труба для создания и исследования развития многослойного стратифицированного потока / Н. И. Болонов, В. Г. Лобачев // *Известия АН СССР. Серия : Физика атмосферы и океана.* – 1979 – Т. 15, № 3. – С. 335-338.
10. Автоматические подводные аппараты / М. Д. Агеев, Б. А. Касаткин, Л. В. Киселев и др. – Ленинград : Судостроение, 1981. – 224 с. – (Техника освоения океана).
11. А. с. 72341 Способ наведения торпед на движущиеся надводные и подводные объекты / И. Л. Повх, Н. И. Болонов, А. А. Подушак и др. – № 1534330 ; заявл. 11.05.71 ; [неопубл.].
12. Силенко Е. М. Использование магнитогидродинамического метода в измерителях поля скорости потока жидкости / Е. М. Силенко, В. Г. Чеплюков // *Физическая гидродинамика : сб. науч. тр. / отв. ред. И. Л. Повх.* – Донецк : ДонГУ, 1990. – С. 93-98.
13. А. с. № 1144057 СССР, МКИ G 01P5/08. Устройство для измерения пульсаций скорости потока электропроводной жидкости / Е. М. Силенко, А. С. Бодня, В. В. Яковенко. - опубл., Бюл. № 9. Открытия. Изобретения. – 1985. - № 9. – С. 161.
14. А. с. № 250372 Способ и устройство для наведения торпед на движущиеся надводные и подводные объекты / И. Л. Повх, Е. М. Силенко, А. С. Бодня и др. – № 3137451 ; заявл. 1.11.1985, зарегистрировано 02.03.1987 ; [неопубл.].
15. Силенко В. Е., Силенко С.Е. Выбор сигнала и первичного измерительного преобразователя для распознавания турбулентных неоднородностей / В. Е. Силенко, С. Е. Силенко // *Роль технических наук в развитии общества : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. (26-27 нояб. 2015 г.).* – Кемерово : КузГТУ, 2015. – С. 144.

16. Разделимость статистик перемежаемого турбулентного течения / Е. М. Силенко, С. Е. Силенко, И. И. Худяков, Н. А. Пригода // Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности : материалы I Междунар. науч. конф. (Донецк, 16-18 мая 2016 г.). – Ростов-на-Дону : Изд-во Южного федерального ун-та, 2016. – Т. 1 : Физико-математические, технические науки и экология / под общ. ред. проф. С. В. Беспаловой. – С. 189-191.
17. Тихонов В. Н. Выбросы случайных процессов / В. Н. Тихонов. – Москва : Наука, 1970. – 392 с.

*Поступила в редакцию 20.09.2019 г.*

#### APPLIED ASPECTS OF THE PHENOMENON OF INTERMITTENT

*N.I. Bolonov, E.M. Silenko, S.E. Silenko, V.E. Silenko*

The recognition algorithm is proposed that allows to reduce the uncertainty of calculating the intermittency function. The method is proposed for studying the evolution of the turbulent wake of a surface ship in a naturally turbulent medium - the upper mixed layer of the sea. The experiments were carried out using a trajectory-controlled self-propelled autonomous underwater apparatus. The research results were used to build a hydrodynamic model of the turbulent wake of the surface ship. Experimental results prove the ability to control a self-propelled autonomous underwater apparatus by artificially created turbulent disturbances.

**Keywords:** turbulence, recognition algorithm, intermittent function, autonomous underwater apparatus, turbulent wake track, surface ship, velocity pulsations, primary measuring transducer.

**Болонов Николай Иванович**

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

**Bolonov Nikolay Ivanovich**

Doctor of Technical Sciences, Full Professor of the Department of Physics of Nonequilibrium, Metrology and Ecology named after I.L. Povkha of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

**Силенко Евгений Михайлович**

старший научный сотрудник ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.  
E-Mail: turbdon@mail.ru

**Silenko Evgeniy Mihaylovich**

Senior Researcher of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

**Силенко Сергей Евгеньевич**

ведущий инженер ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.

**Silenko Sergey Evgeniyevich**

Lead Engineer of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

**Силенко Виктория Евгеньевна**

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель ГОУ ВО МО «Государственный гуманитарно-технологический университет», Российская Федерация, Московская обл., г. Орехово-Зуево.

**Silenko Victoria Evgenyevna**

Candidate of Phisico-Mathematical Sciences, Senior Lecturer of Moscow Regional Institution of Higher Education " University for Humanities and Technologies", Russian Federation, Moscow region, Orekhovo-Zuevo.

## РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.38

БОРЬБА С БЕСПИЛОТНИКАМИ С ПОМОЩЬЮ  
КОНЦЕНТРАЦИИ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2019 И.М. Иванов, А.А. Курушин

Выполнены расчет и экспериментальное исследование устройства концентрации электромагнитного поля в пространстве, которое можно использовать для нарушения работоспособности дистанционно пилотируемых летательных аппаратов. Антенная решетка из 16 рупорных антенн возбуждается девятью синхронизированными для получения их устойчивого возбуждения магнетронами сантиметрового диапазона. Расчет и оптимизация конструкции выполнены с использованием электродинамического моделирования CST SUITE. Расчеты и эксперименты показали, что температура в целевом объекте на расстоянии 10 м от излучателя может увеличиваться до 500° С за время экспонирования 10 сек.

**Ключевые слова:** ДПЛА, концентрация энергии электромагнитного поля, антенная решетка, синхронизация магнетронов, повышение температуры.

**Введение.** Концентрация энергии электромагнитных (ЭМ) волн СВЧ диапазона необходимо выполнять в следующих случаях. В первом случае это «информационное» использование, включающее в себя связь, радиолокацию, телевидение, зондирование различных объектов, разведку полезных ископаемых, радиоэлектронное противодействие и т.п.

В другом случае это «энергетическое» использование СВЧ-колебаний: различные виды СВЧ-нагрева (в т.ч. плазмы), способы передачи энергии на расстояние, воздействие электромагнитных волн на полупроводниковые СВЧ приборы и биологические объекты с целью нагрева их и нарушения работоспособности [1].

Можно предположить, что при воздействии СВЧ энергии на объект, основное действие оказывает процесс превращения энергии СВЧ поля в энергию хаотических колебаний молекул, т.е. повышение температуры. Изменение состояния биологического объекта под действием облучения, в настоящее время до конца не исследовано. В статье рассматривается энергетическое воздействие СВЧ излучения на дистанционно-пилотируемые летательные аппараты [2].

**Метод концентрации энергии в пространстве.** Для того, чтобы выполнить суммирование мощностей от СВЧ генераторов с различными собственными частотами необходимо обеспечить фазовые сдвиги в системе обратных связей от устройства суммирования [1,3]. В этом случае генераторы аддитивно работают на одной частоте с коэффициентом суммирования  $K_{\text{сум}} = P_{\text{сум}} / \sum P_n$ , близким к 1.

Теоретический вопрос синхронизации и суммирования двух высокочастотных генераторов достаточно широко представлен в работе [3]. В частности показано, что решение нелинейного дифференциального уравнения для разности фаз между основным и синхронизирующим сигналом имеет вид:  $\sin \varphi = \frac{Q_{\text{внеш}}(\omega_1 - \omega)}{|\rho| \omega_0}$ , где  $\varphi$  -

мгновенная разность фаз между колебаниями генератора и синхронизирующим сигналом,  $Q_{\text{внеш}}$  - внешняя добротность,  $\rho$  - коэффициент отражения,  $\omega_1$  - частота

синхронизирующего сигнала,  $\omega$  - частота свободных колебаний при наличии нагрузки,  $\omega_0$  - собственная частота колебаний генератора. Синхронизация возможна при  $|\sin \varphi| < 1$ .

Условие синхронизации:  $|\omega_1 - \omega| \leq \frac{|\rho|}{Q_{внеш}} \omega_0$ , определяет полосу «захвата». Синхронизация

генераторов обеспечивает увеличение мощности и одновременно улучшает частотную стабильность системы, что существенно для информационных и энергетических систем.

Для энергетического воздействия на объекты, находящихся на расстоянии ближнего поля радиопередатчика ЭМ энергии, необходимо в точке создать ЭМ поле, которое, переходя в тепло, повышает температуру до температуры необратимых изменений свойств материала (возгорания, плавления, механического разрушения, пробоя или химического преобразования).

Для этого, в любом случае нужно создать в этой точке ЭМ поле с большой напряженностью. Это можно сделать с помощью концентрации ЭМ поля в пространстве, самым очевидным способом чего является применение антенной решетки. Для решения этой задачи применяем 9 магнетронных генераторов, работающих на рупорную структуру ФАР с шестнадцатью излучателями (рис.1), каждый из которых способен излучать ЭМ энергию мощностью 1 кВт.

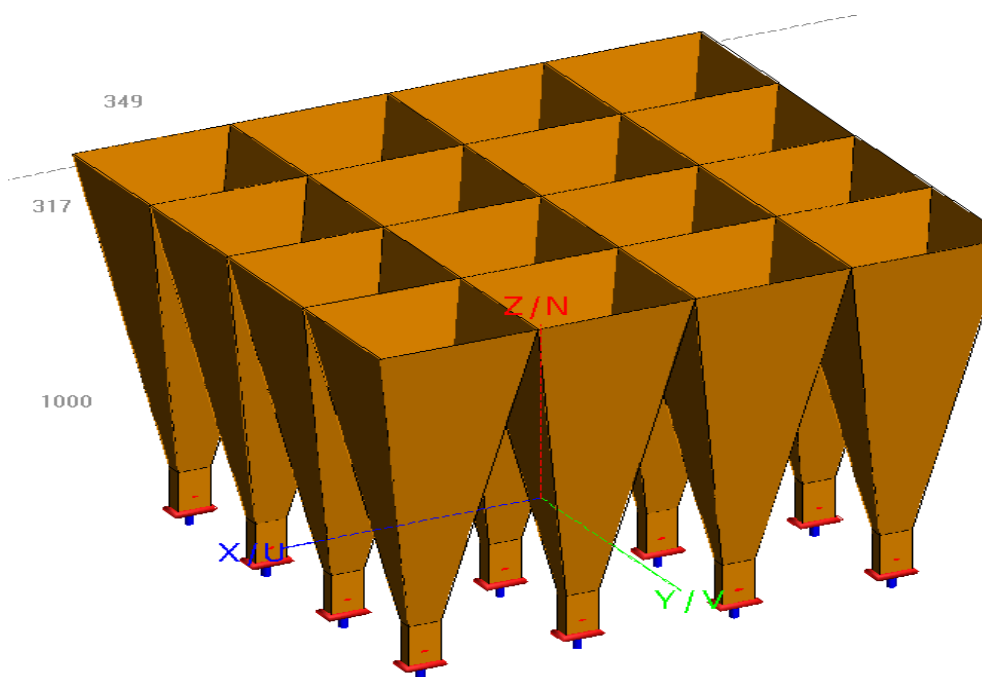


Рис. 1. Реализация ФАР для концентрации поля в пространстве

В качестве базовой схемы для суммирования и синхронизации магнетронных генераторов была выбрана схема Е. Дэвида [3] на основе волноводов сечением 34 мм x 72 мм, представленная, для трех магнетронных генераторов (3/4), на рис. 2. В дальнейшем результат был обобщен на излучатель 9/16.

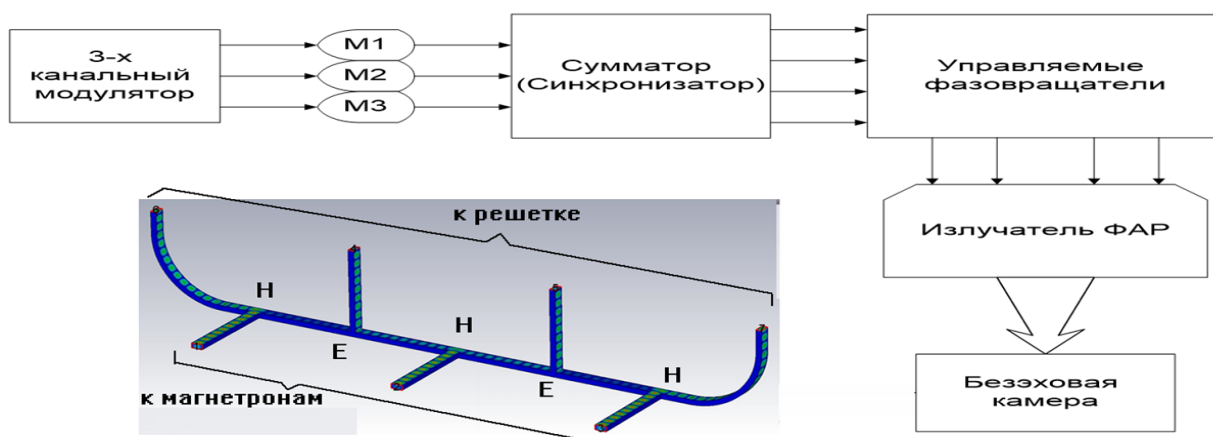


Рис. 2. Структура системы концентрации поля (3/4)

Данная схема включает три тройника Н-типа и два тройника Е-типа, связанных между собой отрезками волноводов. При этом порты 1,2,3 являются входными, а порты 4,5,6,7 выходными. С помощью математического моделирования был выполнен расчет и оптимизация геометрических размеров сумматора для работы на частоте входных сигналов используемых генераторов. В результате проведения оптимизации:

- обеспечено равномерное распределение мощности на выходных портах схемы ( $P_{\text{вых}1} \approx P_{\text{вых}2} \approx P_{\text{вых}3} \approx P_{\text{вых}4}$ , при этом разброс  $\Delta P_{\text{вых}}$  составил не более 5%)
- обеспечено необходимое равномерное распределение отраженной мощности на входных портах схемы ( $P_{\text{отр}1} \approx P_{\text{отр}2} \approx P_{\text{отр}3}$ , при этом разброс  $\Delta P_{\text{отр}}$  составил не более 5%, при отражении  $\rho < -10$  дБ),
- обеспечена необходимая рабочая полоса частот не менее 200 МГц,
- коэффициент суммирования ( $K_{\text{сум}} = \sum P_{\text{вых}} / \sum P_{\text{вх}}$ ) составил 0,8.

После расчета данная схема была проверена в экспериментальном варианте. Для питания 16 выходов использована система с 12 входами. Для дальнейшей концентрации поля был произведен расчет и изготовление фазированной решетки (излучатель ФАР).

#### Моделирование и проектирование устройств концентрации поля.

Инструментами для расчета мощности поглощения в целевом объекте могут быть современные программы электродинамического моделирования FEKO Altair, HFSS ANSYS, однако в настоящее время наиболее подходит для этих целей программа CST SUITE, которая с большой точностью может рассчитать повышение температуры в среде, на которые воздействует ЭМ поле (рис. 3), а также поток частиц, воздействующих на электронные приборы, находящиеся в целевом объекте.

Воздействие мощности ЭМ поля на целевой объект можно представить в виде наведения на нем токов, генерирующих тепло, а также перевод энергии фотонов в энергию хаотического движения частиц.

Передача данных о напряженности электрического поля, полученная в FEKO, в программу CST, позволяет рассчитать температурное распределение как в установившемся (статическом) состоянии, так и в динамическом. Нарастание температуры в различных точках целевого объекта, показывает зависимости температуры в процессе экспонирования в различных точках объекта (рис. 4).

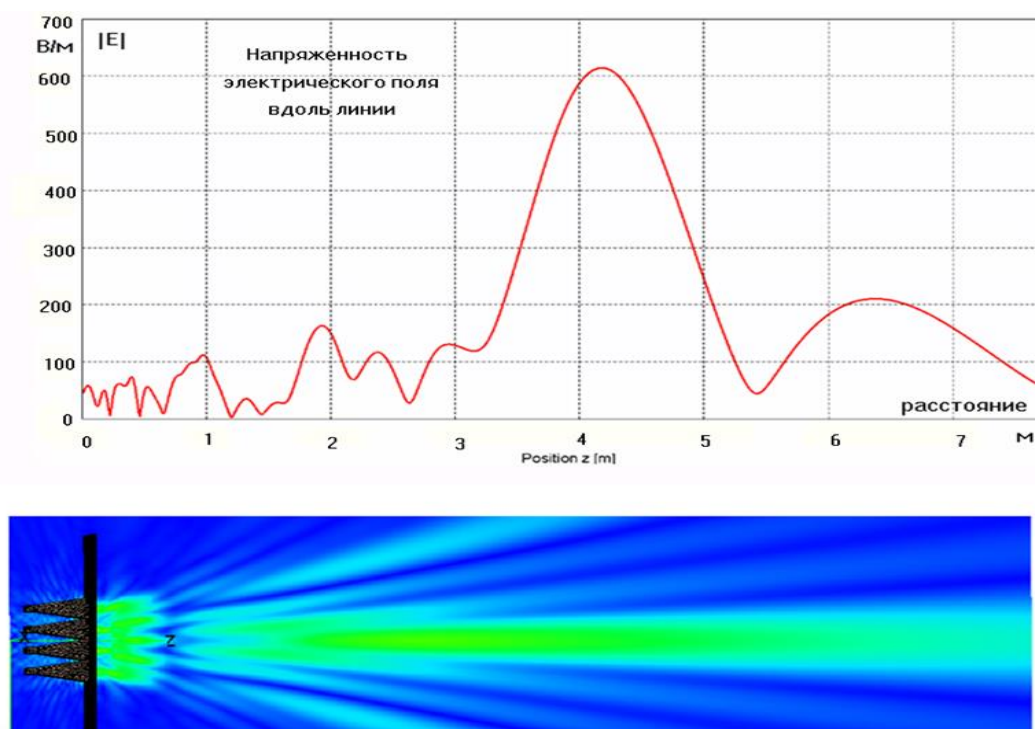


Рис. 3. Ближнее поле фазированной антенной решетки и напряженность электрического поля вдоль оси излучения

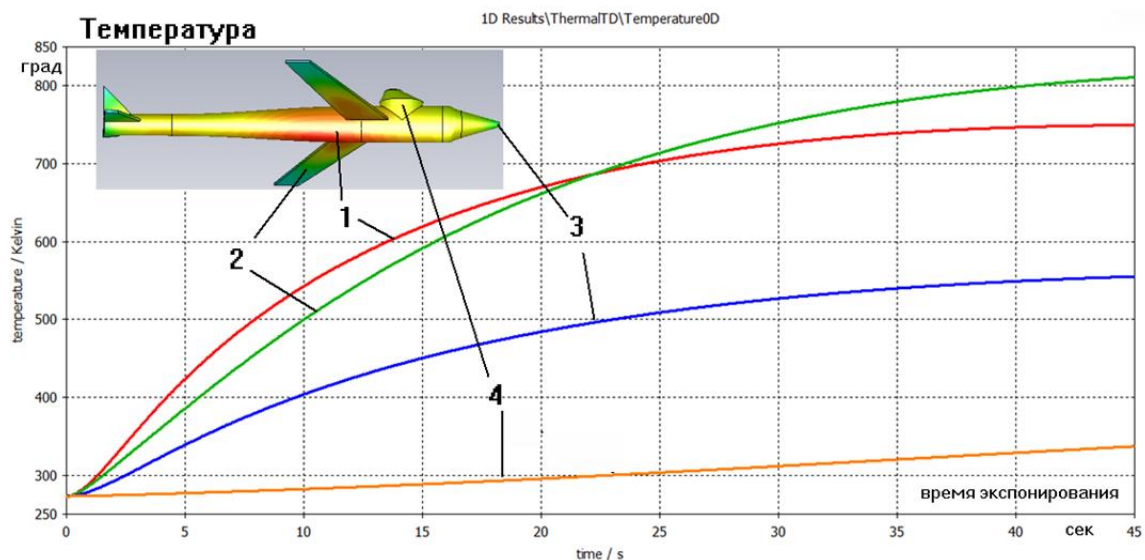


Рис. 4. Динамическое изменение температуры облучаемого объекта (расчет на CST MWS)

Расчеты и эксперименты показали, что температура в целевом объекте на расстоянии 10 м от может увеличиваться до 500° С за время экспонирования 10 сек.

В условиях разреженного пространства, которое имеет место в мощных СВЧ приборах – электронных лампах, ЛБВ, ЛОВ, магнетронах, а также в условиях космоса, температура устройства повышается за счет бомбардировки металлов с потерями частицами. Этот механизм превращения энергии частиц в тепловую энергию



рассчитывается в программе CST PARTICLE [5]. Из рис. 4 видим, что за 10 сек экспонирования температура на объекте увеличивается на несколько сотен °С.

**Экспериментальные результаты.** Работа магнетронов в составе одномерной антенной решетки 3/4 была проверена в безэховой камере. Плотность мощности измеряется в районе максимального поля (рис. 3).

На рис. 5 представлена визуализация спектра на выходе ФАР 3/4, на рис. 6 – сечение ближнего поля, полученного с помощью тепловизора на расстоянии 1,5 м. Виден «ножевой» характер диаграммы излучения.

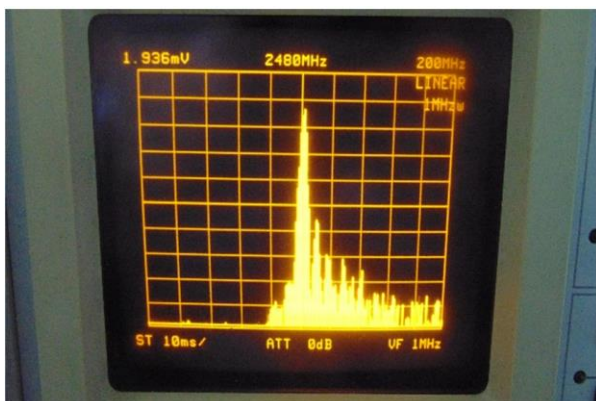


Рис. 5. Спектр на выходе синхронизированных магнетронов

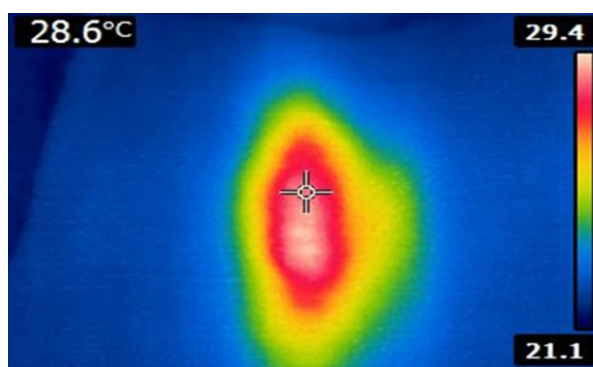


Рис. 6. Сечение диаграммы излучения

Кроме того, по результатам ранних работ по синхронизирующим излучающим устройствам [4] научным коллективом во главе с Р.Ф. Мюллером было изготовлено и испытано устройство сложения и синхронизации магнетронов 4/4 которое также может быть использовано для направленного энергетического воздействия на объект (рис. 7).



Рис. 7. Синхронизатор на четырех магнетронах

При анализе взаимодействия ЭМ излучения с полупроводниковыми приборами были проанализированы силы, действующие на электрон в неоднородном высокочастотном электромагнитном поле. Обращается внимание на то, что в определенных условиях для учета воздействия возможно применение силы Гапонова-



Миллера [6] как градиента потенциала, зависящего от амплитуды ВЧ-поля вблизи поверхности полупроводника. В 70-е годы учет действия этих сил в системах со знакопеременным магнитным полем позволил создать лазеры на свободных электронах – высокоэффективные устройства для генерации терагерцевых волн. «Несинхронные взаимодействия» этих полей имеют нерезонансный характер. Отметим, что действие этих сил может быть отнюдь не «малым» и в ряде случаев сопоставимым с действием «синхронных» сил.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белобаба И. Н. Концентрация электромагнитного поля с помощью открытого зеркального резонатора : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.07 / Белобаба Ирина Николаевна. – Москва, 2000. – 115 с.
2. Чистяков Н. В. Главный конструктор ДПЛА / Николай Чистяков. – Москва : Сам Полиграфист, 2017. – 270, [4] с.
3. Дейвид Е. Е. Фазирование высокочастотными сигналами / Е. Е. Дейвид // Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями / пер. с англ. под ред. М. М. Федорова. – Москва : Иностранная литература, 1961. – 556 с.
4. Иванов И. М. Синхронизация магнетронов с выводом энергии в свободное пространство / И. М. Иванов, А. А. Курушин // Излучение и рассеяние ЭМВ – ИРЭМВ-2013 : тр. Междунар. науч. конф., Таганрог ; Дивноморское, 24-28 июня, 2013 г.
5. Ефремова М. В. Моделирование СВЧ приборов с помощью программы CST Particle Studio / Ефремова М. В., Иванов И. М., Курушин А. А. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2018. – 332 с. – (Серия Системы проектирования).
6. Гапонов-Грехов А. В. О потенциальных ямах для заряженных частиц в высокочастотных полях / А. В. Гапонов-Грехов, М. А. Миллер // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1958. – Т. 34, № 2. – С. 242-243.

*Поступила в редакцию 03.09.2019 г.*

#### FIGHTING DRONES WITH CONCENTRATION OF ELECTROMAGNETIC FIELDS

*I.M. Ivanov, A.A. Kurushin*

The paper presents the results of calculation and experimental studies of devices of electromagnetic field concentration in space, which can be used to destroy drones.

**Keywords:** Drones, the concentration fields in space antenna array, synchronization of the magnetrons, the temperature rise of the drones

##### **Иванов Игорь Михайлович**

Начальник отдела ООО «Плутон»,  
Российская Федерация, г. Москва.  
E-mail: veta-kim@mail.ru

##### **Ivanov Igor Michaylovich**

Head of Department design Magnetron,  
«PLUTON»,  
Russian Federation Moscow.

##### **Курушин Александр Александрович**

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

##### **Kurushin Aleksandr Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,  
Associate Professor of Moscow Power Engineering Institute,  
Russian Federation Moscow.

## ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.421

### ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РЕАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ ЛИНЕЙНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ПЛАТФОРМАХ .NET FRAMEWORK И .NET CORE

© 2019 Т.В. Шарий

В статье производится исследование способов программной реализации цифровых линейных фильтров в среде .NET. Описаны алгоритмы и программный код фильтров с конечной и бесконечной импульсной характеристикой. Фильтрация осуществляется как в частотной, так и временной областях. Приведены результаты сравнительного анализа скорости работы фильтров на платформах .NET Framework 4.7 и .NET Core 2.1, а также рекомендации по выбору подходящей реализации.

**Ключевые слова:** .NET, C#, цифровой фильтр, импульсная характеристика, разностные уравнения.

**Введение.** На протяжении нескольких последних лет в сфере информационных технологий активно разрабатываются специализированные программные инструменты и библиотеки для научных исследований и практического применения в новаторских проектах. Основная часть таких инструментов направлена на исследования в области машинного обучения и цифровой обработки сигналов (звука, изображений, видео, сейсмических сигналов и т.д.) [1-4]. Это обусловлено тем, что подавляющее большинство современных передовых научно-технических разработок связано с данными направлениями. Наиболее популярными языками программирования для прототипирования и визуализации научных моделей являются Python и R, а с точки зрения практической реализации, самыми эффективными остаются языки C и C++ с возможным добавлением параллельных вычислений CUDA, т.к. эти технологии предоставляют самые большие возможности для оптимизации производительности.

В свою очередь, в последнее время активно развивается среда .NET. На данный момент в ней присутствует богатая экосистема, обладающая рядом достоинств, таких как: кросс-платформенность, надежность, достаточно высокая скорость, удобство создания графических интерфейсов настольных, мобильных и web-приложений, широкие возможности Azure для облачных вычислений. Тем не менее, на сегодняшний день существует не так много .NET-библиотек с отдельными функциями цифровой обработки сигналов, а универсальных решений, аналогичных, к примеру, пакету `sciPy.signal` или `MATLAB Signal Processing Toolbox` [5], практически нет. Функции, связанные с цифровой фильтрацией, предоставляют библиотеки `Math.NET Filtering` [6], `Bonsai` [7], `DspSharp` [8].

Таким образом, задача эффективной реализации цифровых линейных фильтров на современных версиях платформ .NET является актуальной. Анализ источников выявил, что подробные исследования по данной проблеме еще не проводились. Следует также отметить, что .NET-решение гарантированно не превзойдет по эффективности решение с CUDA-распараллеливанием, но вопрос уменьшения времени выполнения цифровой фильтрации средствами .NET, тем не менее, остается важным.

**Постановка задачи.** Целью работы является программная реализация, анализ эффективности и ускорение цифровой фильтрации сигналов на платформах .NET

Framework и .NET Core. В статье исследуется наиболее используемый и теоретически проработанный класс фильтров: линейные инвариантные к сдвигу цифровые фильтры (Linear Time-Invariant filters, LTI filters). Фильтрация производится как во временной, так и частотной областях.

**Линейные цифровые фильтры.** Линейными называются фильтры, для которых соблюдается принцип суперпозиции: линейная комбинация входных цифровых сигналов преобразуется в идентичную линейную комбинацию выходных сигналов. Также добавляется свойство инвариантности к сдвигу: задержка входного сигнала во времени приводит к аналогичной задержке выходного сигнала [2]. Линейные фильтры характеризуются уникальной передаточной функцией

$$H(z) = \frac{\sum_{k=0}^N b_k z^{-k}}{1 + \sum_{m=1}^M a_m z^{-m}} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_N z^{-N}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_M z^{-M}},$$

где  $N+1$  – количество нерекурсивных коэффициентов фильтра;  $M+1$  – количество коэффициентов обратной связи (рекурсивной части) фильтра.

Во временной области линейный фильтр описывается разностным уравнением

$$y[n] = \sum_{k=0}^N b_k x[n-k] - \sum_{m=1}^M a_m y[n-m], \quad (1)$$

где  $n$  – индекс текущего отсчета сигнала;  $x$  и  $y$  – входной и выходной сигналы, соответственно.

В общем случае число  $M$  не равно 0, в связи с чем, импульсная характеристика фильтра является бесконечной (БИХ-фильтр). Нерекурсивные фильтры (без обратной связи в уравнении (1)) имеют конечную импульсную характеристику (КИХ-фильтры). На рис.1 показаны схемы реализации КИХ- и БИХ-фильтров.

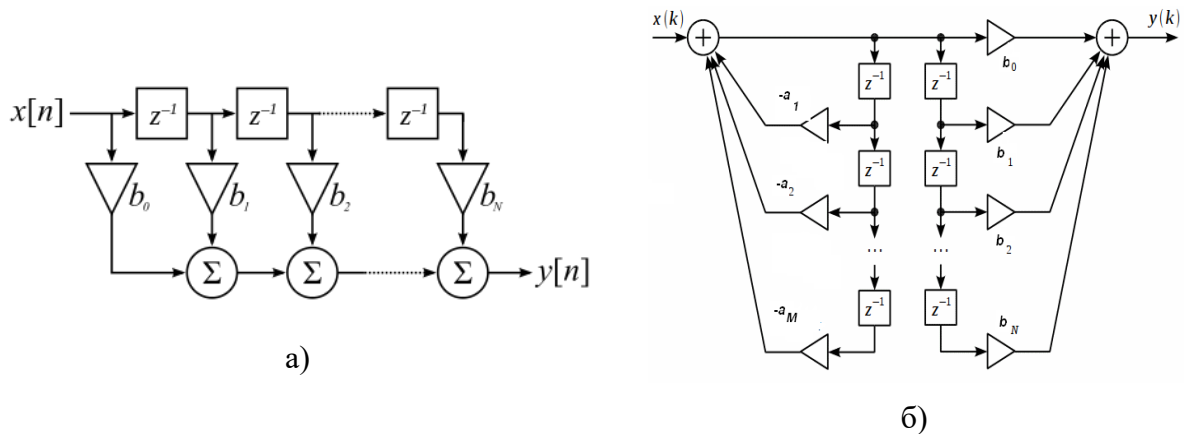


Рис. 1. Схема реализации линейного цифрового фильтра:

а) КИХ-фильтр; б) БИХ-фильтр

В частотной области линейная фильтрация производится с помощью секционной свертки на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ) [3]. Для данной процедуры применяются два традиционных алгоритма: перекрытие с суммированием и перекрытие с сохранением. В работе реализован второй алгоритм, несколько выигрывающий по скорости у первого, т.к. он не требует дополнительных арифметических операций.

Последовательность шагов следующая: 1) выбирается размер секции  $N$ . Это число должно быть не меньше размера ядра КИХ-фильтра  $L$  (обычно  $N > 4L$ ) и степенью двойки; 2) вычисляется  $N$ -точечное комплексное БПФ ядра свертки, дополненного нулями справа; 3) входной сигнал разбивается на перекрывающиеся фрагменты (секции) размером  $N$  отсчетов с величиной сдвига в  $N-L+1$  отсчетов; 4) выполняется  $N$ -точечное комплексное БПФ каждой секции, при этом каждая секция предваряется  $L-1$  отсчетами, сохраненными в конце предыдущей секции; 5) результат БПФ ядра комплексно умножается на результат БПФ секции; 6) вычисляется обратное БПФ полученного произведения; 7) полученный блок добавляется к уже отфильтрованному сигналу; последние  $L-1$  отсчетов сохраняются для следующей секции.

Технически секционную свертку можно применять и к БИХ-фильтрам, для чего необходимо обрезать импульсную характеристику до конечного размера  $N$ , но результат фильтрации, очевидно, будет отличаться от конечно-разностной схемы.

**Алгоритмы и программная реализация фильтров.** Существует два возможных способа обработки сигналов с помощью конечно-разностных уравнений вида (1). Первый способ предполагает, что входной сигнал доступен полностью и размещен в непрерывной области памяти в виде массива. В этом случае фильтрация производится в режиме «оффлайн» и программно реализуется напрямую с помощью цикла по всем отсчетам входного сигнала, без дополнительных структур данных. Однако в большинстве случаев данные поступают на обработку последовательно в режиме реального времени, и каждый выходной отсчет вычисляется при поступлении очередного входного отсчета. Такой процесс еще называется онлайн-фильтрацией. В этом случае для корректной реализации уравнения (1) входные данные накапливаются в линии задержки, которая обычно программируется с помощью циклической очереди. Ниже приводится код типового решения на языке C# для КИХ-фильтра:

```
float Process(float sample)
{
    float output = 0;
    delayLine[offset] = sample;
    int pos = 0;
    for (int k = offset; k < size; k++)
    {
        output += b[pos++] * delayLine[k];
    }
    for (int k = 0; k < offset; k++)
    {
        output += b[pos++] * delayLine[k];
    }
    if (--offset < 0) offset = size - 1;
    return output;
}
```

Листинг 1. Код реализации работы КИХ-фильтра (версия 1)

В листинге 1 используются переменные  $size$  (размер ядра КИХ-фильтра, т.е. количество коэффициентов  $b$ ),  $delayLine$  (массив линии задержки размера  $size$ ) и  $offset$  (позиция в линии задержки для текущего отсчета; при обработке очередного нового отсчета входного сигнала  $offset$  смещается на 1 влево; при достижении нулевого индекса  $offset$  устанавливается в конец очереди). Эти переменные являются полями класса `FirFilter`, одним из методов которого является и функция `Process`.

Временная сложность функции `Process` –  $O(K)$ , где  $K$  – размер ядра фильтра. Соответственно, временная сложность алгоритма обработки  $N$  отсчетов –  $O(NK)$ . В

коде листинга 1 проход по циклическому буферу линии задержки начинается с отсчета по индексу `offset` до конца массива и затем с нулевого отсчета до индекса `offset - 1`. Это в определенной степени замедляет фильтрацию, в силу особенностей работы кэш-памяти процессора. Поэтому в работе для сравнения была реализована вторая версия метода `Process`. В этой версии вопрос непрерывности прохода по массиву решается путем дублирования коэффициентов  $b$ :

```
// В конструкторе класса сначала создается «удвоенный» массив b:
// [b0, b1, ... bN] -> [b0, b1, b2, ... bN, b0, b1, b2, ... bN]

float Process(float sample)
{
    delayLine[offset] = sample;
    float output = 0;
    for (int i = 0, j = size - offset; i < size; i++, j++)
    {
        output += delayLine[i] * b[j];
    }
    if (--offset < 0) offset = size - 1;
    return output;
}
```

Листинг 2 – Код реализации работы КИХ-фильтра (версия 2)

Версия листинга 2 требует вдвое больше памяти для коэффициентов фильтра, имеет ту же временную сложность  $O(NK)$ , что и первая версия, однако учитывает нюансы архитектуры современных процессоров.

Для БИХ-фильтров были запрограммированы также две версии с аналогичными отличиями (класс `IirFilter`).

Кроме того, к экспериментам были подготовлены версии кода, работающие с вещественными числами двойной точности (`double`, 64 бит) вместо одинарной точности (`float`, 32 бит). Современные компиляторы и процессоры уже практически не имеют проблем со скоростью операций над 64-битными вещественными числами (что и подтвердили дальнейшие эксперименты), поэтому зачастую выбор определяется из соображений более эффективного использования оперативной памяти или прямой необходимости в двойной точности вычислений.

**Среда .NET.** Перед проведением сравнительного анализа скорости программных реализаций фильтров необходимо иметь представление о спецификации `.NET Standard`. Данная спецификация определяет базовый набор программных интерфейсов, который должна реализовать любая `.NET` платформа, без конкретных деталей реализации и без привязки к операционным системам. Этот базовый набор называется `BCL` (`Base Class Library`, библиотека базовых классов) [9].

Исторически первой и по-прежнему очень популярной является платформа `.NET Framework` (текущая версия имеет номер 4.7). Ее ключевым элементом является общезыковая среда выполнения (`Common Language Runtime, CLR`) [9]. Встроенный в виртуальную машину `CLR JIT-компилятор` (`just-in-time compiler`) «на лету» преобразует промежуточный байт-код в машинные коды процессора. Виртуальная машина `CLR` также обеспечивает базовую безопасность, управление памятью, организацию системы генерации и перехвата исключений.

Платформа `.NET Core` основана на `.NET Framework` и появилась относительно недавно. В ней используется отдельная среда выполнения `CoreCLR`, включающая новый `JIT-компилятор` `RyuJIT`, встроенный сборщик мусора и другие компоненты. В

связи с этим, можно ожидать, что скорости выполнения одного и того же кода в .NET Framework и .NET Core будут отличаться.

**Описание эксперимента и анализ результатов.** Эксперимент проводился с аудиоданными в формате PCM WAV со следующими характеристиками: частота дискретизации – 22050 Гц, количество бит на отсчет – 16, количество каналов – 1 (моно сигнал). Замеры времени производились несколько раз и в различном порядке, затем полученные значения усреднялись. Размеры ядра фильтра варьировались в пределах от 5 до 47 отсчетов. Фильтры проектировались низкочастотными, с частотой среза 20% от частоты Найквиста (впрочем, конкретный вид ядра фильтра не играет роли в этих экспериментах). На рис.2 приведены результаты фильтрации сигнала длительностью 20 минут (около 26,5 миллионов отсчетов).

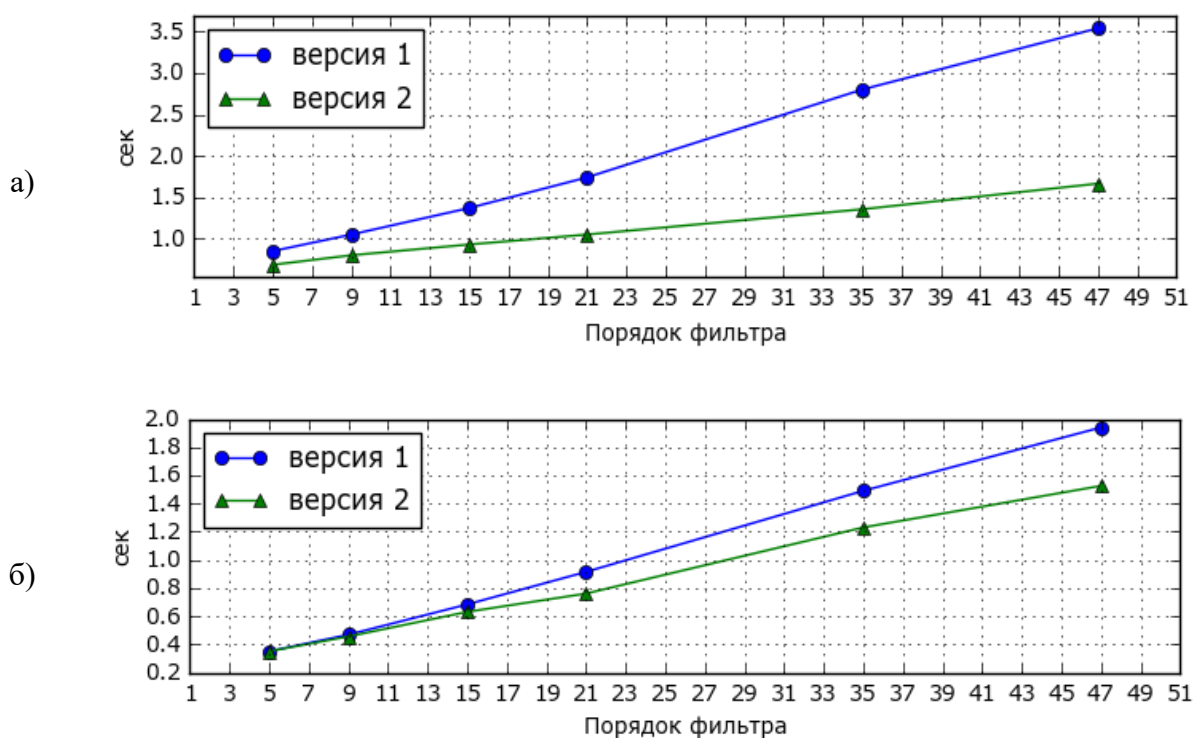


Рис. 2. Результаты сравнения эффективности реализаций КИХ-фильтра:

а) .NET Framework 4.7; б) .NET Core 2.1

Эксперименты производились на компьютере со следующими характеристиками: процессор Intel Core i3 с тактовой частотой 3,5 ГГц; объем оперативной памяти 12 Гб.

Как видно из графиков, реализация .NET Core работает значительно быстрее .NET Framework, особенно для малых размеров ядра фильтра. Кроме того, в .NET Core не так ощутим разброс между версиями кода фильтрации. Максимальный прирост 1.2х-1.3х достигается на размерах ядра более 35 коэффициентов. В случае с .NET Framework вторая версия гораздо в большей степени выигрывает по сравнению с первой. Прирост варьируется в пределах от 1.2х до 2.2х с ростом размера ядра фильтра. Эксперименты с БИХ-фильтрами также выявили повышение эффективности для второй версии кода, но прирост оказался ощутимо меньше в обеих платформах .NET. В .NET Core 2.1 разница между версиями почти незаметна. Также, вполне ожидаемо, при размере ядра фильтра более 60 коэффициентов, конечно-разностная схема реализации фильтрации начинает стремительно уступать схеме, основанной на секционной свертке.

**Выводы.** Проведенные исследования позволили сравнить показатели скорости цифровой фильтрации различными способами на новейших платформах .NET. Исходя из результатов, можно выработать следующие рекомендации для КИХ-фильтров. Если размер фильтра превышает 55-60 отсчетов, целесообразно применять секционную свертку на любой платформе (стандартное решение). Для меньших порядков фильтров на платформе .NET Framework более предпочтительна вторая версия кода. На платформе .NET Core выбор между двумя версиями кода не так критичен, и на первый план могут выйти вопросы памяти: вторая версия немного быстрее, но требует в два раза больше памяти. В случае с БИХ-фильтрами можно остановиться на первой версии кода, т.к. прирост скорости начинает ощущаться при большом числе коэффициентов, не свойственном для БИХ-фильтров, применяемых на практике.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Lyons R. G. Understanding Digital Signal Processing / R. G. Lyons. – Third Edition. – Upper Saddle River, NJ [et al.] : Prentice Hall, 2014. – 984 p.
- 2 Downey A. B. Think DSP. Digital Signal Processing in Python / A. B. Downey. – Needham, Massachusetts : O'Reilly Media, 2016. – 176 p.
- 3 The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing by S.W. Smith [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dspguide.com>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения: 20.08.2019.
- 4 Orfanidis S. J. Introduction to signal processing / S. J. Orfanidis. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 2010. – 783 p.
- 5 Signal Processing Toolbox [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/products/signal.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения: 20.08.2019.
- 6 Math.NET Filtering [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://filtering.mathdotnet.com>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения: 20.08.2019.
- 7 Bonsai. A visual programming language for reactive systems built on top of Rx for .NET [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bitbucket.org/horizongir/bonsai>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения: 20.08.2019.
- 8 DspSharp. API for Digital Signal Processing in C# [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/Jonarw/DspSharp>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения: 20.08.2019.
- 9 Common Language Runtime (CLR) Overview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/standard/clr>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения: 20.08.2019.

*Поступила в редакцию 02.09.2019 г.*

#### ON SPECIFICS OF DIGITAL LINEAR FILTERS REALIZATION ON .NET FRAMEWORK AND .NET CORE PLATFORMS

*T.V. Sharii*

The article provides research of program implementation of digital linear filters in .NET environment. The algorithms and program code of finite and infinite impulse response filters are described. Filtering is carried out both in time and frequency domain. The results of comparative analysis of filtering performance on .NET Framework 4.7 and .NET Core 2.1 platforms are given, as well as recommendations concerning the choice of appropriate realization.

**Keywords:** .NET, C#, digital filter, impulse response, difference equations.

**Шарий Тимофей Вячеславович**

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

**Sharii Timofei Viacheslavovich**

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

УДК 004.62

## ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ УЧАСТКОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ

© 2019 И.А. Третьяков

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

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

**Введение.** Экспериментальные кривые являются одним из способов представления результатов научных исследований. Таким образом представляют, например, хроматограммы в анализе физико-химических свойств веществ, электрофонокардиограммы и электроэнцефалограммы в медицине, спектры колебаний молекул в спектроскопии. Методам анализа экспериментальных данных посвящено множество работ [1-3]. В данной статье рассматривается структурный метод анализа экспериментальных данных, а именно лингвистический подход к анализу экспериментальных кривых. В лингвистическом анализе экспериментальных кривых выделяется последовательность реализации трех основных этапов обработки кривой: выделения и распознавания характерных участков [4], присвоения выделенным участкам символов некоторого алфавита, анализа полученных последовательностей символов. Данная работа посвящена второму этапу обработки - присвоению выделенным участкам символов некоторого алфавита или лингвистическому описанию участков экспериментальных кривых.

**Постановка задачи.** На этапе сегментации исследуемую кривую разделяют на ряд чередующихся участков, граничащих друг с другом и характеризующихся постоянством некоторых признаков формы кривой каждого участка. Средняя форма исследуемой

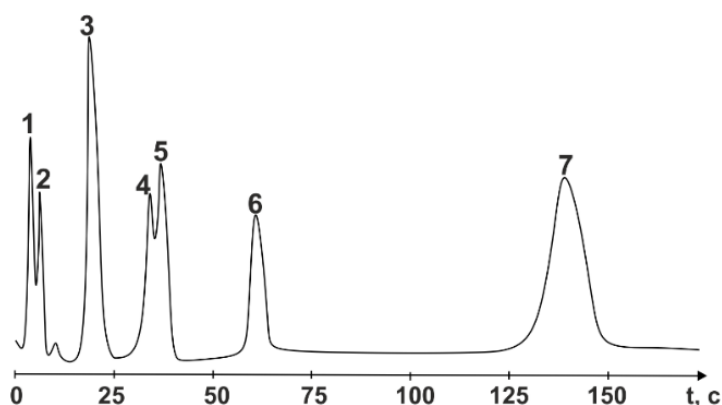


Рис. 1. Хроматограмма паров взрывчатых веществ на поликапиллярной колонке при температуре 170°C

кривой на участке является устойчивым признаком соответствующего события. Например, устойчивой формой обладают также пики на хроматограммах (рис. 1).

Классификация участков осуществляется по векторам их устойчивых признаков. Следовательно, возникает задача составления набора векторов признаков для дальнейшего анализа этих участков. Данная статья является продолжением исследований работы [5], и

посвящена реализации и исследованию алгоритмов, представленных в этой работе.



**Классификация участков экспериментальных кривых.** Участки устойчивой формы, регулярно повторяющиеся в процессе события назовем участками регулярного типа. Например, форма  $P$ ,  $Q$ ,  $R$ ,  $S$ ,  $T$  зубцов, характеризующая состояние сердечной мышцы человека, регулярно повторяется на электрокардиограммах (рис. 2а). Участки, напоминающие случайные колебания вокруг некоторого не изменяющегося во времени среднего уровня, которые свойственны для данного события, назовем участками шумоподобного типа. Шумоподобные участки целесообразно характеризовать набором статистических свойств соответствующего случайного процесса, сопоставляя эти свойства с данным определенным событием. Типичными примерами шумоподобных участков являются выделяемые на фонокардиограмме отдельные акустические колебания, так называемые 1-й, 2-й, 3-й и 4-й тоны, а также наблюдаемые в промежутках между ними систолический и диастолический шумы (рис. 2б).

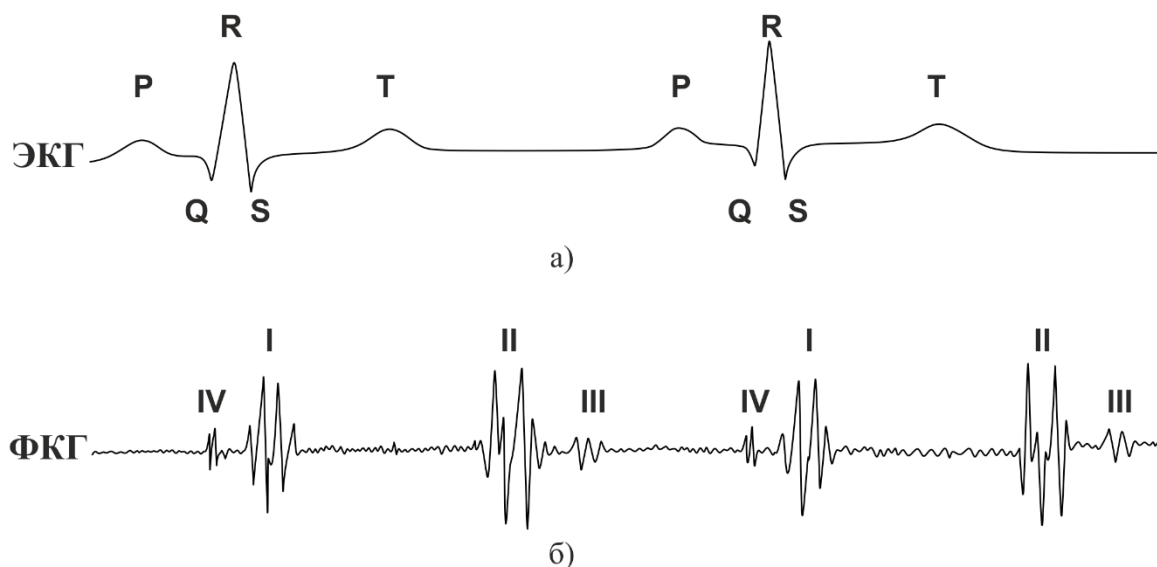


Рис. 2. Электро - и фоно - кардиограмма человека

Классификация участков на устойчивые и не устойчивые зависит от того, чем можно охарактеризовать анализируемые участки, т.е. от векторов их признаков. Простейший вектор признаков это набор ординат экспериментальной кривой на анализируемом участке  $f^j = (f_1^j, \dots, f_i^j)$ . Вводится некоторую степень  $r(f^i, f^j)$ , характеризующую расстояние для любых значений  $f^i$ ,  $f^j$  и учитывающую отличие их длин. Используя данную метрику возможно классифицировать исследуемые участки в метрическом пространстве. В связи с тем, что в современном мире постоянно возрастает сложность технологических процессов, сложность новых научных теорий и результаты научных исследований в виде экспериментальных данных содержат десятки и сотни тысяч компонентов, возникает задача перехода от метрического пространства в координатное. Рассмотрим относительно малое количество из всех участков в метрическом пространстве, для которых построено достаточно большое количество  $k$  опорных (искусственных) участков  $h^1, \dots, h^k$ , эвристически характеризующих их форму. Тогда вектор признаков  $g^i = (g_1^i, \dots, g_k^i)$  характеризует форму любого участка  $f^i$ . В качестве вектора признака принимается вектор его расстояний до опорных участков

$g_p^i = r(f^i, \dots, h_p)$ . Такой вектор признаков  $g^i$  учитывает зависимость выбранной степени расстояния в пространстве форм исследуемых участков. Таким образом, набор опорных участков  $\{h^1, \dots, h^k\}$  позволяет осуществить преобразование участков различной длины из метрического пространства  $X$  в  $k$ -мерное пространство  $Y$ , в котором и будут применяться алгоритмы автоматической классификации.

В работе [5] представлены два таких алгоритма автоматической классификации, а именно алгоритм выбора степени отличия для участков различной длины и алгоритм построения опорных участков векторной параметризации. Через конечное число циклов работы данных алгоритмов будет достигнута устойчивая классификация, а именно для любого  $f^j \in A^i$  расстояние  $r$  до эталона своего класса не будет превышать расстояние до других эталонов, что свидетельствует о том, что ни один вектор не будет перенесен из одного класса в другой.

Алгоритм выбора степени отличия для участков различной длины:

1. Выберем два участка  $f^i = (f_1^i, \dots, f_{l_i}^i)$  и  $f^j = (f_1^j, \dots, f_{l_j}^j)$ , где  $l_i$  и  $l_j$  их длины.
2. Центрируем векторы:  $\bar{f}^i = \frac{1}{l_i} \sum_{t=1}^{l_i} f_t^i = 0$  и  $\bar{f}^j = \frac{1}{l_j} \sum_{t=1}^{l_j} f_t^j = 0$ .
3. Выберем фиксированный сдвиг  $\tau = \max(l_i, l_j)$ .
4. Выберем множество индексов  $\tilde{T} = \{1, \dots, 2l_j + l_i\}$  (см. рис.1) и сопоставим из него:
  - вектору  $f^i$  индексы  $s = l_j + 1, \dots, l_j + l_i$ ;
  - вектору  $f^j$  индексы  $s = l_j + 1 - \tau, \dots, 2l_j - \tau$ .
5. Степень расстояния  $p(f^i, f^j, \tau)$  между векторами  $f^i$  и  $f^j$  является степенью их отличия на всем множестве  $\tilde{T}(\tau)$ .

Алгоритм построения опорных участков векторной параметризации:

1. Выберем несколько  $k$  векторов из множества  $\{f^1, \dots, f^n\}$ , обозначив их  $\{h^i, i = 1, \dots, k\}$ .
2. Соотнесем каждому вектору  $h^i$  подмножество  $A^i \subset \{f^1, \dots, f^n\}$ .
3. Рассчитаем расстояние  $r(h^i, f^{k+1})$  от вектора  $f^{k+1}$  до всех векторов  $h^i$  и определим ближайший, обозначив его  $h^{i*}$ .
4. Внесем вектор  $f^{k+1}$  в множество  $A^{i*}$  и определим вектор  $(h^{i*})'(A^{i*})$ .
5. Рассчитаем расстояние  $r(h^i, f^n)$  от вектора  $f^n$  до всех  $h^i$  и определим  $i^*$  с самым минимальным расстоянием.
6. Определим класс  $A^{i_n}$  для вектора  $f^n$ , внесем его в  $A^{i*}$  и осуществим пересчет эталонов изменившихся классов согласно правилу  $h^{i_n} = (h^{i_n})'(A^{i_n})$ ,  $h^{i*} = (h^{i*})'(A^{i*})$ .
7. Векторы  $h^1, \dots, h^k$ , полученные в результате минимизации, принимаются опорными участками векторной параметризации или же эталонами их классов.

Через конечное число циклов работы данного алгоритма будет достигнута устойчивая классификация, а именно для любого  $f^j \in A^i$  расстояние  $r$  до эталона своего класса не будет превышать расстояние до других эталонов, что свидетельствует о том, что ни один вектор не будет перенесен из одного класса в другой. Определять к одному ли классу относятся два исследуемых участка экспериментальной кривой нужно в таком их взаимном расположении, в котором они максимально совпадают по форме. Поэтому в качестве степени отличия участков разной длины следует принять величину  $r(f^i, f^j) = \min_{\tau} p(f^i, f^j, \tau)$ .

**Реализация и исследование алгоритмов лингвистического описания.** Предлагаемые алгоритмы были реализованы на высокоуровневом языке программирования общего назначения Python и применены к задаче присвоения символов анализируемым участкам экспериментальных кривых. В качестве экспериментальных данных были выбраны записи ЭКГ, с использованием одной из схем усиления биопотенциала из лабораторного сеанса длительностью 16 минут на частоте дискретизации 100 Гц, находящиеся в свободном доступе на электронном ресурсе [6]. Экспериментальные данные ЭКГ содержали более 95000 точек отсчета. Сегмент экспериментальной кривой, построенной по этим данным изображен на рисунке 3.

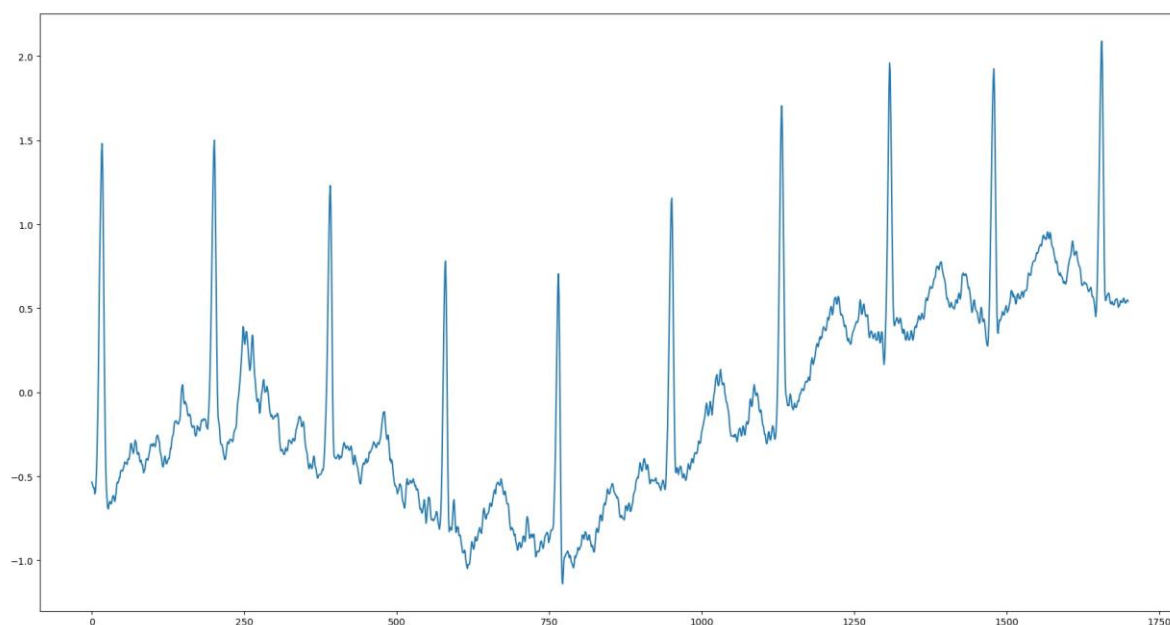


Рис. 3. Сегмент электрокардиограммы

Предложенным алгоритмом экспериментальная кривая была классифицирована на 5 классов. Классам были присвоены соответствующие символы P, Q, R, S, T. После анализа всех точек отсчета экспериментальной кривой в первый класс было определено 378 участков, во второй - 420, в третий - 480, в четвертый - 452, и наконец в пятый - 370. На рисунке 4 представлен интерфейс программы, осуществляющий классификацию. Сегменту экспериментальной кривой, построенной на участке от 0 до 500 точек, изображенному на рисунке 4, соответствует цепочка символов: PQRSTPQRST. Полученная классификация находит значительную схожесть с реальной расшифрованной электрокардиограммой (рис. 2).



Рис. 4. Лингвистическое описание участков экспериментальных кривых

**Выводы.** Полученный в результате классификации алфавит символов будет являться классификатором необычных явлений в ходе анализируемого процесса. В отдельных случаях данный этап лингвистического анализа экспериментальных кривых может являться самостоятельным аппаратом анализа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Третьяков И. А. Функции сложности для выделения и распознавания характерных участков экспериментальных кривых / И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2017. – № 2. – С. 101-107.
2. Данилов В. В. Алгоритмы идентификации переходных участков экспериментальных кривых с применением аппроксимации / В. В. Данилов, И. А. Третьяков, А. В. Шалаев, Я. И. Рущечников // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2018. – № 48. – С. 19-23.
3. Третьяков И. А. Методы параллельной сегментации экспериментальных кривых / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 36-41.
4. Pavlidis T. Linguistic Analysis of Waveforms / T. Pavlidis // Software Engineering / J. T. Tou (Ed.). – New York, 1971. – Vol. 2. – P. 203-225.
5. Данилов В. В. Алгоритмизация присвоения символов анализируемым участкам экспериментальных кривых / В. В. Данилов, И. А. Третьяков, Я. И. Рущечников // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2018. – № 51. – С. 15-22.
6. Data from ECG recording in today's class URL <https://bioelectromagnetism.wordpress.com/2012/11/28/data-from-ecg-recording-in-todays-class/> (дата обращения: 01.09.2019).

Поступила в редакцию 12.09.2019 г.

#### ANALYSIS OF ALGORITHMS FOR LINGUISTIC DESCRIPTION OF THE EXPERIMENTAL CURVE SITES

I.A. Tretiakov

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

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

**Третьяков Игорь Александрович**

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

**Tretiakov Igor Aleksandrovich**

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

УДК 004.67

## ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ПРОХОЖДЕНИЕ НОСИТЕЛЯ ИНФОРМАЦИИ ЧЕРЕЗ ПЕРЕДАЮЩИЕ СРЕДЫ

© 2019 В.В. Данилов, В.И. Тимченко, В.А. Гмыря

В настоящей работе для математического описания характеристики границы раздела вводится волновая матрица передачи (по аналогии с матрицей передачи в радиоэлектронике), содержащая соответствующие коэффициенты передачи и отражения.

**Ключевые слова:** оптические информационные технологии, волновая матрица передачи, граница раздела диэлектриков.

**Введение.** Исследуя пространство, ограниченное двумя параллельными плоскостями, на предмет поиска математического описания коэффициента передачи и импульсной характеристики, предполагалось отсутствие препятствий на пути распространения электромагнитных волн [1, 2], в работах [3, 4] рассмотрены основы физического описания процессов преобразования и переноса информации многомерными сигналами. В оптических информационных технологиях, имеют дело с носителем информации, электромагнитным полем, где переносчиком выступают электромагнитные волны, распространяющейся в неоднородной среде. Точного решения уравнений Максвелла для этого случая из-за сложности задачи пока не известно.

Наиболее простым является случай, когда электромагнитные волны переходят из одной среды в другую с плоской границей раздела между ними [5, 6]. При распространении в среде, электромагнитная волна подвергается изменениям, которые зависят от электрических свойств среды: диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$ , магнитной проницаемости  $\mu$  и удельной проводимости  $\delta$ . Рассмотрим поля на границе раздела двух сред с разными электрическими свойствами (рис. 1). Сделаем допущение, что на границе раздела происходит резкое изменение  $\varepsilon$ , и  $\mu, \delta$ . Тогда вектора поля испытывают резкие изменения. Встает необходимость определить поле с одной и другой стороны от поверхности раздела, так как только такой подход дает возможность найти поле в произвольной точке пространства. Формальные выражения для векторов поля на границе двух сред получают из уравнений Максвелла [6].

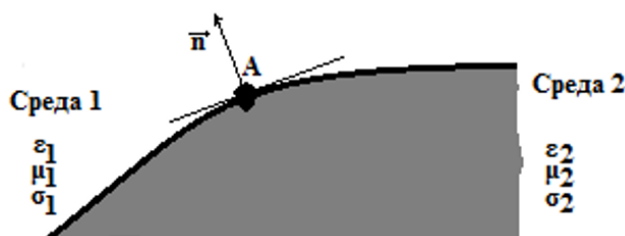


Рис. 1. Граница раздела двух сред с разными электрическими свойствами

На рис. 1 проведем к точке А касательную плоскость, а к ней – нормаль  $n$ . Индекс 1 имеют величины, относящиеся к первой среде, а индекс 2, ко второй. Введем обозначения:  $q$  – поверхностная плотность заряда,  $j_S$  – поверхностная плотность тока. Анализируя уравнения Максвелла, получают следующие условия для полей на границе раздела:

- нормальная компонента вектора  $\vec{B}$  на границе раздела непрерывна:

$$B_{n1} = B_{n2}, \text{ или } \vec{n}(\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0, \quad (1)$$

учитывая,  $\vec{B} = \mu \vec{H}$ , тогда  $\mu_1 H_{n1} = \mu_2 H_{n2}$ ;

- скачок нормальной компоненты вектора электрической индукции  $\vec{D}$  при переходе из одной среды в другую равен поверхностной плотности электрического заряда:

$$D_{n2} - D_{n1} = q \text{ или } \vec{n}(\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = q, \quad (2)$$

при условии равенства нулю поверхностного заряда, нормальная компонента вектора  $\vec{D}$  на границе раздела непрерывна. Учитывая, что  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ , это условие может быть представлено в форме  $\epsilon_1 E_{n1} = \epsilon_2 E_{n2}$ ;

- тангенциальная компонента вектора  $\vec{E}$  при переходе из одной среды в другую не изменяется, т. е. на границе раздела она непрерывна:

$$E_{tg1} = E_{tg2} \text{ или } [\vec{n}; \vec{E}_2 - \vec{E}_1] = 0. \quad (3)$$

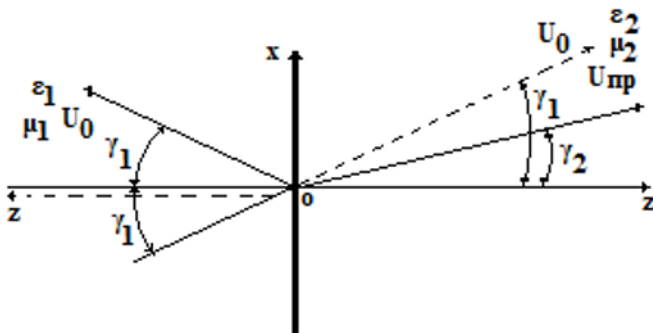


Рис. 2. Отражение и преломление волн на плоской границе раздела двух сред

- скачкообразное изменение тангенциальной компоненты вектора  $\vec{H}$  при переходе из одной среды в другую равно поверхностной плотности тока:

$$H_{tg1} - H_{tg2} = j_s, \text{ или}$$

$$[\vec{n}; \vec{H}_2 - \vec{H}_1] = j_s \quad (4)$$

У сред с конечной проводимостью поверхностный ток равен нулю, тогда тангенциальная компонента вектора  $\vec{H}$  на границе

раздела сред непрерывна т.е.:  $H_{tg1} = H_{tg2}$ .

**Отражение и преломление электромагнитных волн на границе раздела двух диэлектриков.** При падении плоской электромагнитной волны на плоскую границу раздела двух диэлектриков (рис. 2), возникают отраженная и преломленная волны. Пусть  $q_s = 0$  и  $j_s = 0$ . При угле падения  $\gamma_1$ , угол отражения равен  $\gamma_1$ . Следующее равенство позволяет найти угол преломления  $\gamma_2$ :

$$n_1 \sin \gamma_1 = n_2 \sin \gamma_2, \quad (5)$$

здесь  $n_1$  и  $n_2$  — показатели преломления первой и второй сред ( $n = \frac{c}{v} = c\sqrt{\varepsilon\mu}$ ,  $c$  - скорость электромагнитной волны в вакууме,  $v$  - скорость электромагнитной волны в среде распространения). Введем обозначения  $U_n$ ,  $U_0$  и  $U_{np}$ , соответствующие падающей, отраженной и преломленной волны. Через комплексный коэффициент отражения  $\Gamma$  и коэффициент пропускания (прозрачности)  $T$ , те же величины равны  $\Gamma = \frac{U_0}{U_n}$ ;  $T = \frac{U_{np}}{U_n}$ . Значения коэффициентов отражения и пропускания будут различными, в зависимости от вида поляризации падающей волны (в плоскости падения или перпендикулярно плоскости падения). Ниже приведены формулы для  $\Gamma$  и  $T$ , полученные из граничных условий 1 – 4:

→  
- вектор  $E_n$  перпендикулярен к плоскости падения:

$$\Gamma = (1 - \frac{\mu_1 \operatorname{tg} \gamma_1}{\mu_2 \operatorname{tg} \gamma_2}) / (1 + \frac{\mu_1 \operatorname{tg} \gamma_1}{\mu_2 \operatorname{tg} \gamma_2}), \quad T = 2 / (1 + \frac{\mu_1 \operatorname{tg} \gamma_1}{\mu_2 \operatorname{tg} \gamma_2});$$

→  
- вектор  $E_n$  параллелен плоскости падения:

$$\Gamma = (-\frac{\mu_1}{\mu_2} \sin 2\gamma_1 + \sin 2\gamma_2) / (\frac{\mu_1}{\mu_2} \sin 2\gamma_1 + \sin 2\gamma_2),$$

$$T = 2\sqrt{(\mu_1 \varepsilon_1) / (\mu_2 \varepsilon_2)} \cdot \sin 2\gamma_1 / (\frac{\mu_1}{\mu_2} \sin 2\gamma_1 + \sin 2\gamma_2).$$

При нормальном падении  $\gamma_1 = 0$ ,  $\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{n_1}{n_2}$  и обе системы сводятся к

выражениям:  $\Gamma = \frac{W_2 - W_1}{W_2 + W_1}$ ;  $T = \frac{2W_2}{W_2 + W_1}$ , где  $W_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}}$ ,  $W_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}$  - волновые

сопротивления второй и первой сред.

Для волны, поляризованной перпендикулярно к плоскости падения, может наблюдаться полное внутреннее отражение. Пусть  $\gamma_2 = \pi/2$ , тогда  $\sin \gamma_1 = n_2 / n_1 < 1$ . Следовательно, полное внутреннее отражение может быть лишь в том случае, когда вторая среда оптически менее плотна, чем первая.

Для волны, поляризованной параллельно плоскости падения, отраженная волна может отсутствовать. Тогда из выражения для коэффициента отражения получаем:

$$\sin 2\gamma_2 = \frac{\mu_1}{\mu_2} \sin 2\gamma_1.$$

Сделав допущение, что  $\mu_1 = \mu_2$  (справедливо для диэлектриков), то  $\gamma_2 = \pi/2 - \gamma_1$ . Используя (5),  $n_1 \sin \gamma_1 = n_1 \sin(\frac{\pi}{2} - \gamma_{21}) = n_2 \sin \gamma_1$ , откуда

$$n\gamma_1 = \operatorname{arctg} \frac{n_2}{n_1}. \quad (7)$$

Выражение (7) описывает угол падения, при котором отраженная волна не возникает (угол Брюстера). При отношении  $n_2/n_1 = 1,5$ , угол Брюстера равен  $\gamma_1 \approx 56^\circ$ . Обозначим коэффициенты отражения и пропускания  $\Gamma_{12}$  и  $T_{12}$ , соответственно при прямой передаче, а при изменении направления передачи на противоположное:  $\Gamma_{21}$  и  $T_{21}$ . Для получения зависимостей для  $\Gamma_{21}$  и  $T_{21}$ , нужно в соответствующих формулах для  $\Gamma_{12}$  и  $T_{12}$ , поменять местами углы  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ , а также параметры среды. В результате получим следующие выражения:

- вектор  $\vec{E}_n$  перпендикулярен к плоскости падения:

$$\Gamma_{21} = (1 - \frac{\mu_2}{\mu_1} \cdot \frac{\operatorname{tg} \gamma_2}{\operatorname{tg} \gamma_1}) / (1 + \frac{\mu_2}{\mu_1} \cdot \frac{\operatorname{tg} \gamma_2}{\operatorname{tg} \gamma_1}) = -\Gamma_{12},$$

$$T_{21} = 2 / (1 + \frac{\mu_2}{\mu_1} \cdot \frac{\operatorname{tg} \gamma_2}{\operatorname{tg} \gamma_1}) = \mu_2 / \mu_1 \cdot T_{12} \operatorname{tg} \gamma_2 / \operatorname{tg} \gamma_1;$$

- вектор  $\vec{E}_n$  параллелен плоскости падения:

$$\Gamma_{21} = (\sin 2\gamma_1 - \frac{\mu_2}{\mu_1} \sin 2\gamma_2) / (\sin 2\gamma_1 + \frac{\mu_2}{\mu_1} \sin 2\gamma_2) = -\Gamma_{12},$$

$$\begin{aligned} T_{21} &= 2 \sqrt{\frac{\mu_2 \varepsilon_2}{\mu_1 \varepsilon_1}} \frac{\sin 2\gamma_2}{\frac{\mu_2}{\mu_1} \sin 2\gamma_2 + \sin 2\gamma_1} = \sqrt{\frac{\mu_2 \varepsilon_2}{\mu_1 \varepsilon_1}} \sqrt{\frac{\mu_2 \varepsilon_2}{\mu_1 \varepsilon_1}} \frac{\mu_1 \sin 2\gamma_2}{\mu_2 \sin 2\gamma_1} T_{12} = \frac{n_2^2}{n_1^2} \frac{\mu_1 \sin 2\gamma_2}{\mu_2 \sin 2\gamma_1} T_{12} = \\ &= \frac{\mu_1 \sin^2 \gamma_1}{\mu_2 \sin^2 \gamma_2} \frac{\sin 2\gamma_2}{\sin 2\gamma_1} T_{12} = \frac{\mu_1 \operatorname{tg} \gamma_1}{\mu_2 \operatorname{tg} \gamma_2} T_{12}. \end{aligned}$$

Итак, при любой поляризации падающей волны:

$$\Gamma_{21} = -\Gamma_{12}; \quad T_{21} \mu_2 \operatorname{tg} \gamma_2 = \mu_1 \operatorname{tg} \gamma_1 T_{12}. \quad (8)$$



**Волновая матрица передачи.** Связь коэффициентов отражения и пропускания для прямой и обратной передач (8) дает возможность рассматривать плоскую границу раздела между двумя средами как «черный ящик», на входе которого действуют падающая и отраженная волны, а на выходе — преломленная волна. Используя аналогии из электроники, сделаем допущение что «черный ящик», это четырехполюсник.

При существовании нескольких границ раздела, на выходе «четырёхполюсника», кроме преломленной, будет и отраженная волна. Обозначим через  $a_1$  и  $a_2$  - прямые волны, распространяющиеся слева направо, а через  $b_1$  и  $b_2$  - обратные волны, распространяющиеся в противоположном направлении. Между прямыми и обратными волнами существует линейная связь, так что:

$$a_1 = A_{11}a_2 + A_{12}b_2; \quad b_1 = A_{21}a_2 + A_{22}b_2, \quad (9)$$

где коэффициенты  $A_{11}, A_{12}, A_{21}$  и  $A_{22}$  являются элементами матрицы передачи  $A$  «четырёхполюсника», т.е.:  $A = \begin{pmatrix} A_{11}, A_{12} \\ A_{21}, A_{22} \end{pmatrix}$ .

Определимся с физическим смыслом элементов матрицы  $A$ . Пусть на выходе «четырёхполюсника» отраженная волна отсутствует, т. е.  $b_2 = 0$ , тогда из (9) найдем:

$A_{11} = \frac{a_1}{a_2}; \quad A_{21} = \frac{b_1}{a_2}$ .  $A_{11}$  - отношение падающей волны к преломленной, что равно обратной величине коэффициента пропускания при прямой передаче, т. е.:

$$A_{11} = 1/T_{12}. \quad (10)$$

Определяя  $A_{21}$ , умножим числитель и знаменатель дроби на  $a_1$ ,  $A_{21} = \frac{a_1}{a_2} \cdot \frac{b_1}{a_2}$ .

Согласно [7], коэффициент отражения при прямой передаче есть отношение отраженной волны  $b_1$  к падающей  $a_1$ , тогда получаем:

$$A_{21} = \Gamma_{12}/T_{12}. \quad (11)$$

**Оптический «четырёхполюсник» при обратной передаче.** Считая волну  $a_1 = 0$

, из (9) получаем  $A_{12} = -a_2 A_{12}/b_2; \quad A_{22} = \frac{b_1}{b_2} - \frac{a_2}{b_2} A_{21}$ . При обратной передаче падающую волну описывает  $b_2$ , отраженную  $a_2$ , а преломленную  $-b_1$ . Тогда:

$a_2/b_2 = \Gamma_{21}; \quad b_1/b_2 = T_{21}$ , и поэтому:  $A_{12} = -\Gamma_{21}A_{11}; \quad A_{22} = T_{21} - \Gamma_{21}A_{21}$ .

Используя выражения (10) и (11), находим  $A_{12} = -\frac{\Gamma_{21}}{T_{12}}; \quad A_{22} = T_{21} - \Gamma_{21} \frac{\Gamma_{12}}{T_{12}}$ . Так

как  $\Gamma_{21} = -\Gamma_{12}$ , то:

$$A_{12} = \frac{\Gamma_{12}}{T_{12}} = A_{22}, \quad (12)$$

$$A_{22} = T_{21} + \frac{\Gamma_{12}^2}{T_{12}}. \quad (13)$$

Определитель  $(A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21})$  матрицы  $A$  не равен единице, потому она необратима. При обратимости матрицы коэффициенты передачи в прямом и обратном направлениях равны, в общем же случае этого не происходит:  $T_{12} \neq T_{21}$ .

Зная элементы матрицы передачи, можно найти коэффициенты отражения и пропускания:  $T_{12} = \frac{1}{A_{11}}$ ;  $\Gamma_{21} = -\Gamma_{12} = \frac{A_{12}}{A_{11}}$ ;  $T_{21} = \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{A_{11}}$ . В случае, когда  $\mu_1 = \mu_2$ , а вектор  $\vec{E}_n$  перпендикулярен плоскости падения, имеем:

$$\Gamma_{21} = -\Gamma_{12} = \frac{tg\gamma_1 - tg\gamma_2}{tg\gamma_1 + tg\gamma_2} = \frac{\sin(\gamma_1 - \gamma_2)}{\sin(\gamma_1 + \gamma_2)};$$

$$T_{21} = \frac{2tg\gamma_1}{tg\gamma_1 + tg\gamma_2} = \frac{2\sin\gamma_1 \cos\gamma_2}{\sin(\gamma_1 + \gamma_2)};$$

$$T_{12} = \frac{tg\gamma_2}{tg\gamma_1} T_{21} = \frac{2\sin\gamma_2 \cos\gamma_1}{\sin(\gamma_1 + \gamma_2)}.$$

Используя (10-13) находим величины элементов матрицы передачи «четырёхполюсника»:

$$A_{11} = A_{22} = \frac{\sin(\gamma_1 + \gamma_2)}{2\sin\gamma_2 \cos\gamma_1}; \quad A_{12} = A_{21} = \frac{\sin(\gamma_1 - \gamma_2)}{2\sin\gamma_2 \cos\gamma_1}.$$

**Выводы.** В оптических информационных технологиях, носителем информации является электромагнитное поле, электромагнитные волны которого (переносчик), распространяются, в общем случае, в неоднородной среде. Решения уравнений Максвелла, описывающих процесс для этого случая не известно. Наиболее простым является случай, когда электромагнитные волны переходят из одной среды в другую с плоской границей раздела между ними. Используя комплексные коэффициенты отражения  $\Gamma$  и пропускания  $T$ , установлено их различие в зависимости от вида поляризации падающей волны (в плоскости падения или перпендикулярно плоскости падения), а также их формализованный вид.

Установленная связь коэффициентов отражения и пропускания для прямой и обратной передач (8), позволила предположить, по аналогии с радиоэлектроникой, существование возможности рассматривать плоскую границу раздела между двумя средами как «черный ящик», на входе которого действуют падающая и отраженная

волны, а на выходе - преломленная волна. Сделав допущение что «черный ящик», это «четырёхполюсник», по аналогии с матрицей передачи, введено и обосновано существование волновой матрицы передачи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гмыря В. А. Оптические информационные технологии, инвариантные системы / В. А. Гмыря, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2018. – № 1. – С. 37-46.
2. Гмыря В. А. Оптические информационные технологии. Импульсная характеристика / В. А. Гмыря, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 23-35.
3. Данилов В. В. Оптические информационные технологии. Спектральное представление сигналов / В. В. Данилов, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 1. – С. 36-44.
4. Данилов В. В. Оптические информационные технологии. Дифракция электромагнитных волн / В. В. Данилов, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 36-44.
5. Ярив А. Введение в оптическую электронику / А. Ярив. – Москва : Высшая школа, 1983. – 398 с.
6. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф ; пер. с англ. С. Н. Бреус [и др.] ; под. ред. Г. П. Мотулевич. – Москва : Наука, 1970. – 855 с.
7. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / Андре Анго ; пер. с фр. под общ. ред. К. С. Шифрина ; с предисл. Луи де Бройля. – Москва : Наука, 1965. – 780 с.

*Поступила в редакцию 18.09.2019 г.*

#### OPTICAL INFORMATION TECHNOLOGIES. THE PASSAGE OF THE MEDIA THROUGH THE TRANSMISSION MEDIUM

*V.V. Danilov, V.I. Timchenko, V.A. Gmyrya*

In this paper, a wave transmission matrix (similar to the transmission matrix in radio electronics) containing the corresponding transmission and reflection coefficients is introduced to mathematically describe the characteristic of the interface.

**Keywords:** optical information technologies, wave transmission matrix, dielectric interface.

**Данилов Владимир Васильевич**

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

**Danilov Vladimir Vasilevich**

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

**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

**Timchenko Vladimir Ivanovich**

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

**Гмыря Валерия Александровна**

студентка кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.  
E-mail: radiophysik99@mail.ru

**Gmyrya Valeria Aleksandrovna**

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

УДК621.395

## АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА ЗОН ПОКРЫТИЯ СЕТЕЙ СОТОВОЙ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

© 2019 К.А. Павловская

---

В статье рассмотрены модели прогноза зон покрытия в сетях пятого поколения. В диапазоне частот от 3ГГц до 5 ГГц предложено использовать модель SUI, возможно применение модели для дальнейшей разработки методов построения сетей сотовой связи пятого поколения.

**Ключевые слова:** сеть, сигнал, потери, модель распространения, базовая станция, затухание, скорость передачи.

---

**Введение.** Сети пятого поколения (5G) представляют собой перспективную архитектуру систем беспроводного доступа, основанную на использовании различных малых сот и предназначенную для удовлетворения новых требований по емкости и качеству покрытия сети. Такие гетерогенные многослойные покрытия предполагают наличие базового слоя макросот с дополнительными слоями более плотно размещенных сот меньшего размера, в частности пикосоты, фемтосоты, точки доступа WiFi и т.д. Соответственно, базовая станция макросети служит для обеспечения сетевого подключения и поддержки мобильности терминалов на обширных площадях, тогда как недорогие малые соты применяются для повышения качества и емкости сотового покрытия.

При проектировании сетей мобильной связи 5G для обеспечения требуемых показателей качества QoS и максимальной зоны покрытия обслуживания абонентов большое значение имеет расположение базовых станций.

В процессе прогнозирования зон покрытия базовыми станциями особую роль играет расчет нагрузки сетей мобильной связи, исходя из которого планируют архитектуру будущей сети, координаты базовых станций с учетом заданного качества обслуживания QoS. Одним из основных параметров для расчета нагрузки сети является радиус зоны работы базовой станции, который определяют по уровню потерь сигнала мобильной станции в зависимости от рельефа местности. Наиболее эффективным инструментом определения потерь сигнала мобильной связи является использование эмпирических моделей распространения сигнала систем сотовой связи.

**Постановка проблемы.** Задачи связанные с расчетом распространения радиоволн, достаточно сложные, поскольку необходимо учитывать, ландшафт, плотность застройки местности, большого количества подвижных и не подвижных устройств, зеленых насаждений. Уровень сигнала может изменяться от пиковых значений в десятки децибел, до десятков единиц ниже среднего значения в зонах сильного замирания [1]. Прогноз зон обслуживания базовых станций осуществляется на основе статистических и детерминированных методов. В связи с чем, задача оптимального расположения базовых станций, учитывающая модель распространение сигналов в радиоканале для сетей стандарта 5G является актуальной.

Целью данной статьи является обоснование модели зон покрытия для дальнейшего применения при построении сетей сотовой связи пятого поколения.

**Основная часть.** Некоторые математические модели распространения радиоволн, построенные на основе экспериментальных данных и описывающих поле в

статистически однородной среде (городские застройки, пригород, сельская местность и открытое пространство), являются общепризнанными, о чем свидетельствуют рекомендации ITU и СЕРТ, и могут быть использованы как достаточное приближение для расчета зон покрытия в сетях пятого поколения [2].

Одним из крупных исследований в области эмпирических методов является работа Окамуры. В основе модели Окамуры лежит множество измерений, которые проводились в Токио, результаты которых были впервые представлены в данной работе. При измерениях использовался частотный диапазон от 150 до 1920 МГц [3]. Зависимости потерь сигнала между базовой станцией и абонентом  $(L_{50})_{dB}$  от расстояния  $d$  до передающей антенны базовой станции описывает формула (1):

$$(L_{50})_{dB} = L_s + A(f, d) + G(h_{БСэфф}) + G(h_{ac}), \quad (1)$$

где  $L_s$  - потери сигнала в свободном пространстве;

$A(f, d)$  — медианное значение потерь в городской среде с абсолютно гладкой земной поверхностью по отношению к затуханию в свободном пространстве при условии эффективной высоты антенны базовой станции  $h_{БСэфф} = 200$  м, и высоте антенны станции абонента  $h_{ac} = 3$  м;

$G(h_{БСэфф})$  - коэффициент учитывающий отличие эффективной высоты антенны базовой станции от 200 м, дБ;

$G(h_{ac})$  - коэффициент корректировки, зависящий от высоты антенны абонентской станции, при величине ее отличной от 3 м, дБ.

Потери сигнала базовой станции при распространении в свободном пространстве вычисляются по формулам потерь свободного пространства в логарифмическом масштабе.

Модель Окамуры носит чисто экспериментальный характер и создана на основании данных, полученных в районах Токио. В следствии чего модель Окамуры работает в Европе и США с некоторыми отклонениями из-за разности городской и сельской застройки. Несмотря на это, модель Окамуры является наиболее используемой и считается наилучшей моделью для разработки сотовых систем мобильной связи. Модели Окамуры лучшим образом подходит для городских и пригородных районов, однако, мало эффективна для сельской местности.

Основываясь на эмпирических формулах к графикам, составленным Окамурой была разработана модель Хата. Выражения выведенные Хатом хорошо аппроксимируют графики в определенных диапазонах несущих частот в условиях гладкой земной поверхности. Для данной модели используются следующие эмпирические формулы. В городской местности в частотном диапазоне от 150 до 1500 МГц при эффективной высоте антенны базовой станции  $h_{бсэфф} =$  от 30 до 200 м модель описывается следующей формулой:

$$(L_{50})_{dB/город} = 69,55 + 26,16 \lg f - 13,28 \lg h_{БС} - a(h_{аб}) + (44,9 - 6,55 \lg h_{БС}) \lg d, \quad (2)$$

$$a(h_{аб}) = (1,1 \lg f - 0,7) h_{БС} - 1,56 \lg d + 0,8, \quad (3)$$

где  $a(h_{аб})$  – поправочный коэффициент, который зависит от высоты антенны абонента, которая может быть в пределах от 1 до 10 м.

Коэффициент  $a(h_{аб})$  имеет различные значения в зависимости от плотности застройки (4) и ландшафта местности.

Городские условия:

$$a(h_{аб}) = \begin{cases} (1,1\lg f - 0,7)h_{аб} - 1,56\lg d + 0,8 - \text{малая и средняя застройка} \\ 8,29(\lg(1,54h_{аб}))^2 - 1,1 - \text{плотная застройка при } f \leq 200\text{МГц} \\ 3,2(\lg(11,75h_{аб}))^2 - 4,97 - \text{плотная застройка при } f \geq 200\text{МГц} \end{cases} \quad (4)$$

Сельская застройка:

$$(L_{50})_{dB} = (L_{50})_{dB/\text{город}} - 2 \left( \lg \left( \frac{f}{28} \right) \right)^2 - 5,4 \quad (5)$$

Открытое пространство:

$$(L_{50})_{dB} = (L_{50})_{dB/\text{город}} - 4,78(\lg f)^2 + 18,33\lg f - 40,94 \quad (6)$$

Описанная модель распространения сигнала дает возможность оценить зависимость потери сигнала от несущей частоты, высоты антенн базовой станции и абонента, типа местности. Более точные результаты для описания процессов распространения сигнала при использовании описанных выше формул достигаются для расстояний свыше 1 км и частот до 1,5 ГГц.

Одной из более совершенных моделей является модель Уолфиш-Икегами, разработанная в рамках программы проекта 231 Международного союза по телекоммуникациям (ITU – International Telecommunication Union) и получившая в дальнейшем название COST 231 Уолфиша-Икегами или сокращенно WIM [4]. Эта модель применима для густонаселенной территории с различной расстановкой базовых станций. Данная модель используется при решении задач расстановки базовых станций при следующих базовых параметрах:

- полоса частот от 800 МГц до 2000 МГц;
- высота антенны базовой станции от 4 м до 50 м;
- высота антенны мобильной станции от 1 м до 3 м;
- высота близлежащих к базовой станции зданий  $\leq 80$  м;
- расстояние между домами от 20 м до 50 м;
- ширина улицы от 10 до 25 м;
- ориентация улицы относительно приходящего сигнала от  $0^0$  до  $90^0$ .

Как следует из модели Уолфиша, медианное значение затухания  $L_b$  определяется по эмпирической формуле, это выражение можно описать как сумму потерь распространения волн в свободном пространстве, с учетом потерь отраженного сигнала от зданий с учетом потерь и дифракции сигнала (7) [5]:

$$L_b = \begin{cases} L_o + L_{rts} + L_{msd}, & L_{rts} + L_{msd} \geq 0 \\ L_o & L_{rts} + L_{msd} < 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где,  $L_o$  – потери распространения волн в свободном пространстве (8);

$L_{rts}$  – потери сигнала при отражении от зданий (9);

$L_{msd}$  – потери за счет дифракции (11).

$$L_0 = 32,45 + 20 \lg d_{km} + 20 \lg f_{MHz}, \quad (8)$$

$$L_{rts} = -16,9 - 10 \lg w + 10 \lg f_{MHz} + 20 \lg (h_r - h_2) + L_{ori}, \quad (9)$$

где,  $L_{ori}$  – потери, в следствии расположения улиц относительно направленности сигнала (10);

$w$  – ширина улицы, м.

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi, & 0 \leq \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35), & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4,0 - 0,114(\varphi - 55) & 55^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases}, \quad (10)$$

где  $\varphi$  – угол ориентации улицы относительно направленности сигнала, следует отметить, что при  $\varphi=28,25$  значение  $L_{ori}$  принимает значение равное нулю.

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \cdot \lg d_{km} + k_f \cdot \lg f_{MHz} - 9 \lg b, \quad (11)$$

где,  $L_{bsh}$  – переменная, учитывающая уменьшение потерь, при расположении антенна базовой станции выше зданий (12);

$k_a$  – коэффициент, который учитывающий радиуса соты на потери  $L_{msd}$  (13);

$k_d$  – коэффициент влияния высоты антенны базовых станций относительно зданий (14);

$d_{km}$  – расстояние между базовой и мобильной станцией, км;

$k_f$  – коэффициент, учитывающий влияние значение частоты сигнала в зависимости от ландшафта;

$b$  – расстояние между домами, м.

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \lg(1 + h_1 - h_r), & h_1 > h_r \\ 0 & h_1 \leq h_r \end{cases}, \quad (12)$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & h_1 > h_r, \\ 54 - 0,8(h_1 - h_r), & d_{km} \geq 0,5, h_1 \leq h_r, \\ 54 - 1,6d_{km}(h_1 - h_r) & d_{km} < 0,5, h_1 \leq h_r \end{cases}, \quad (13)$$

где  $h_1$  – высота передающей антенны базовой станции, м;

$h_2$  – высота антенны абонента над уровнем земли, м;

$h_r$  – высота близлежащих к передающей антенне зданий, м.

$$k_d = \begin{cases} 18, & h_1 > h_r, \\ 18 - 15(h_1 - h_r) / h_r & h_1 \leq h_r \end{cases}, \quad (14)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7 \left( \frac{f_{MHz}}{925} - 1 \right), & \text{для городов средних размеров и пригорода} \\ & \text{с умеренными лесопосадками;} \\ -4 + 1,5 \left( \frac{f_{MHz}}{925} - 1 \right), & \text{для крупного города (мегаполиса).} \end{cases}, \quad (15)$$

где  $f_{MHz}$  – частота сигнала, МГц.

При хаотичной застройке значения параметров  $h_r$ ,  $b$ ,  $w$  выбирают исходя из их среднего значения, полученного для маршрута распространения (рис. 1), где  $b_i$  и  $w_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ).

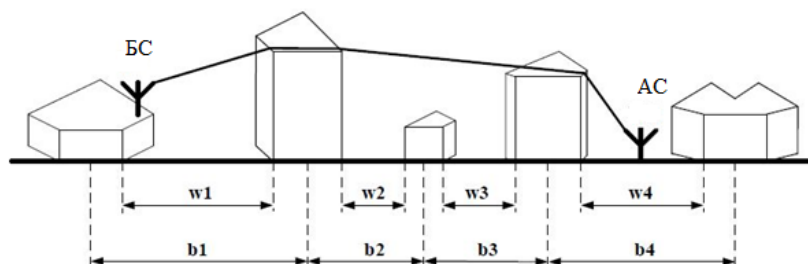


Рис. 1. Определение параметров модели Уолфиша-Икегами для хаотичной застройки

Канальная модель распространения сигналов SUI [5], учитывает потери при распространении по трем различным типам местности и может использоваться для проектирования, разработки и тестирования сетей сотовой связи в диапазоне 1 - 5 ГГц.

Из детального анализа влияния типов местности на качество сигнала следует, что, максимальные потери сигнала возникают при распространении через холмистую местность с деревьями с плотностью от средней до сильной (категория А). Территорией с минимальными потерями при распространении является равнинная местность с малой плотностью деревьев (категория С). Категория В учитывает средние величины потерь распространении сигнала мобильной связи. При определении потерь при распространении сигнала используется корректирующая формула (16), использующая частоту работы базовой станции, высоты антенн базовой и абонентской станции, тип местности.

$$L = 20 \lg \left( \frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) + 10\gamma \lg \left( \frac{d}{d_0} \right) + \delta + 6 \lg \left( \frac{f}{2000} \right) - 20 \lg(0,5 \cdot h), \quad (16)$$

где  $d_0$  – базовое расстояние;  $\lambda$  – длина волны;  $\gamma$  – экспонента потерь при распространении сигнала;  $d$  – расстояние между базовой и абонентской станциями;  $\delta = 8, 2, \dots, 10, 6$  дБ – случайная составляющая потерь при распространении сигнала;  $f$  – рабочая частота,  $h$  – высота подвеса антенны;  $a, b, c$  – коэффициенты, зависящие от категории местности согласно таблице 1.

Таблица 1 Зависимость коэффициентов от категории местности

Коэффициенты	Категория местности А	Категория местности В	Категория местности С
$a$	4,6	4	3,6
$b$	0,0075	0,0065	0,005
$c$	12,6	17,1	20

Для данной модели абоненты представляются множеством статических «тестовых» точек, каждая из которых соответствует сообществу клиентов с одинаковыми условиями передачи сигналов. Каждая тестовая точка имеет свое



предполагаемое количество запросов пользователей, выявленных в результате предварительного исследования. Следовательно, зонам с большой плотностью тестовых точек будет соответствовать большее количество потребляемого трафика.

**Выводы.** На основе анализа моделей распространения сигнала систем сотовой связи необходимо сделать вывод, что модели Окамуры, Хата, Уолфиша-Икегамимогут успешно применяться при планировании систем мобильной связи 2, 3, 4 поколения, однако, все данные модели не могут использоваться для планирования сетей сотовой связи 5G вследствие того, что диапазон их ограничен частотами 2ГГц, а частотный диапазон 5G для мобильных устройств находится от 3 до 5ГГц.

Следовательно, наиболее универсальной моделью прогноза зон покрытия мобильной связи 5G является модель канального распространения сигналов SUI которая может использоваться для частот в диапазоне 1-5ГГц. Таким образом, в рамках данного исследования обоснована возможность применения модели для дальнейшей разработки методов построения сетей сотовой связи пятого поколения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сагымбаев А. А. Расчет проектируемой сети беспроводного доступа стандарта CDMA 450 на территории г. Бишкека и его пригорода / А. А. Сыгымбаев, Т. Т. Мойдунов // Наука и образование сегодня. – 2019. – № 5 (40). – С. 13-16.
2. Аунг Мьинт Эй. Экспериментальное исследование затухания радиоволн внутри помещений на частоте 433 МГц / Аунг Мьинт Эй, А. А. Пронин, А. В. Кондратьев // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2007. – № 5. – С. 86-88.
3. Учебно-методический комплекс. – Текст : электронный. – URL: [www.tolgas.ru/education/Metod\\_TOSMS\\_BTK\\_02.04.2015.pdf](http://www.tolgas.ru/education/Metod_TOSMS_BTK_02.04.2015.pdf) (дата обращения: 15.09.2019).
4. Расчет зон радиопокрытия базовых станций GSM : методические указания к лабораторной работе по курсам «Системы подвижной радиосвязи» и «Сотовые радиотелефонные сети связи для студентов специальности I-45 01 03 «Сети телекоммуникаций» дневной и заочной форм обучения / составитель В. А. Аксенов. – Минск : БГУИР, 2007. – 15 с. – Текст : электронный. – URL: [https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/875/2/Aksenov\\_raschetZon.pdf](https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/875/2/Aksenov_raschetZon.pdf) (дата обращения: 10.09.2019).
5. Channel Models for Fixed Wireless Applications (final IEEE 802.16 TG3 ad hoc version) / Erceg V. [et al.]. – Текст : электронный. – URL: [https://pdfs.semanticscholar.org/0020/fa7ad9633e07cc99ce75aed4870eb5e5c02b.pdf?\\_ga=2.59938532.899712864.1576817672-1183499889.1576817672](https://pdfs.semanticscholar.org/0020/fa7ad9633e07cc99ce75aed4870eb5e5c02b.pdf?_ga=2.59938532.899712864.1576817672-1183499889.1576817672) (дата обращения 12.09.2019).

*Поступила в редакцию 27.09.2019 г.*

### ANALYSIS OF FORECAST MODELS FOR COVERAGE AREAS OF FIFTH GENERATION CELLULAR NETWORKS

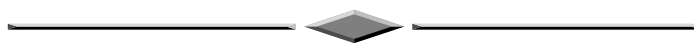
*К.А. Pavlovskaya*

The article discusses the forecast models for fifth-generation coverage areas. It is proposed to use the SUI model, it is possible to use models to develop methods for building fifth-generation cellular networks.

**Keywords:** network, signal, losses, distribution model, base station, attenuation, transmission rate.

**Павловская Ксения Александровна**  
ассистент кафедры автоматизации и телекоммуникаций ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», ДНР, г. Донецк.  
E-mail: [ks\\_pavlovskaya@rambler.ru](mailto:ks_pavlovskaya@rambler.ru)

**Pavlovskaya Kseniya Aleksandrovna**  
Assistant Lecturer at Department of Automation and Telecommunications of Donetsk National Technical University,  
DPR, Donetsk.



UDC 532.135

## THIXOTROPY OF COAL WATER SLURRY

© 2019 A.A. Kovalenko, Y.A. Gusentsova, M.V. Pilavov

In the paper, an easy, simple, but accurate and reliable quantitative experimental method is introduced to describe the thixotropic of CWS (Cool-water slurry). By this method has made researches on thixotropy of four difference kind of coal. On the basis a simple thixotropic model was established which can be practically applied. The model has evaluated the thixotropic amount with a single structure parameter  $S$  which described the relationship of thixotropic properties depending on both shear rate and shear time quantity.

**Keywords:** thixotropy, cool-water slurry, thixotropic model, structure parameter  $S$ .

**Introduction.** CWS (Cool-water slurry) is a kind of highly loaded coal water suspension. The rheology, thixotropy and stability are the basic properties of CWS, which played a very important part in every link of the technology of CWS, for example, in transporting, storing and burning. The thixotropy of CWS is cause by the network structure which formed by the inseparable combination between coal powder and water when the additions was added in [1]. Although the thixotropy of CWS is difficult to deal with in theoretically It has good advantages in technology. During storing, the CWS exhibited yield stress can be prevent the deposition of coal powder. During transporting and atomizing, the structures break-down, this caused the decreasing viscosity. So the fluidity and atomization were improved. In order to meet the two contradictory demands, CWS has the thixotropy best. Despite many experiments had been made on CWS, the most only remained in the qualitative analysis of rheology. Even having quantities formula of half-experience, they loss involved the thixotropy. Prom the engineering point of view, this paper has established a simple, practical thixotropic model based on the theory of Non-Newtonian fluid.

**Analysis on experimental methods of CWS thixotropy.** The thixotropy of suspensions is usually measured by rotational viscometer, so does CWS. Nevertheless so far, the thixotropy is the major remaining problem in the field of theoretical rheology. The main reason is the lack of a perfect measuring method of thixotropy at present.

The traditional method for measuring the thixotropy of suspension is "Hysteresis Loop Method". This is a transient measuring method. The test is to measure the shear stress under continuously increasing the shear rate linearly from zero to some maximum and then decreasing the shear rate to zero linearly at the same rate of change. A series of unclosed flow curves can be obtained by carrying out the test repeat many times. These curves mutually connected with the head to the tail, then, a "screw" curve is formed.

The shear test is continued until these curves form a closed equilibrium loop, called «hysteresis loop». The area of the loop can be used as a measure of the degree of thixotropy.

It is fined that the «Hysteresis Loop Method» has following serious imperfections through the analysis of references and experiments:

1. A rotational viscometer with continuously changeable shear rate and controlled variation of shear rate is required. This kind of viscometer has a high price and strict using conditions.

2. The area and shape of hysteresis loop depends on both the rate of change and the maximum value of the shear rate, even if other conditions controlled identically. The measurement results can also be affected by many other factors. So the results of measurement are poor comparable and their reproducibility worse.
3. The results of measurement can hardly described by mathematical models. So it is necessary to develop a new method to carry out the experimental research of the thixotropy of CWS,

As mentioned above, the thixotropy of CWS is a character displayed when breaking or recovering the network structure happened. Therefore, thixotropy can be expressed by using any varied parameters which changes with breaking and recovering of network structure.

Hence the change of shear stress under constant shear rate can be used to describe the thixotropy at this shear rate, and the experiment procedure of the thixotropy of CWS should be:

1. Using rotational viscometer, CWS is sheared continuously at a constant shear rate, the initial shear stress  $F_0$  is measured and the change of shear stress with shear time can also be recorded continuously.
2. The shear is exerted until the shear stress does not change with shear time, the final stress is equilibrium stress  $F_e$ .
3. The shear is exerted until the shear stress does not change with shear time, the final stress is equilibrium stress  $F_e$ .

It is discovered by experiments that this method is very convenient to operate. The reproducibility and accuracy of the experiment result are much better than that of Hysteresis Loop Method. This is because the Hysteresis Loop Method needs to change the shear rate continuously, and the twist rate of torsion spring; of rotational viscometer is always delay than, the changing rate of the rotative speed of the bobbin. So the shear stress such measured can't really represent the exact shear stress value under the shear rate of CWS. Large systematic errors can be occurred. On the contrary, the later method needs not to change shear rate continuously unlike what Hysteresis Loop Method does. So the claims of experimental equipment and operating condition is levered greatly. It leads the accurate measurement of the thixotropy of CWS can be carryout in general laboratory even in the productive site conveniently.

**Experimental theory.** The thixotropic model was established based on a series of reasonable assumptions. First, we assume that CWS is a viscous fluid. That is, CWS is considered possesses no elasticity and stress relaxation. Therefore, the structure of CWS is only braked down and recovered and will not exhibit elastic deformation during shear. Also the time effect is the thixotropic time and the time of stress relaxation can be omitted.

As the second item in the model, we assumed that the two general equations of thixotropic [2]

$$\text{State equation} \quad \tau = f_1(r, b). \quad (1)$$

$$\text{Rate equation} \quad \frac{ds}{dt} = f_p(s, b). \quad (2)$$

Both are applicable for the thixotropic CWS equally.

As the third item is the model, we assumed the total shear stress of CWS can be resolved into two additive components by taking advantage of the Ritter's thixotropic theory. One is the shear stress  $\tau_{A1}$  which associated with the «Newtonian Solvent», and the other is  $u$  which independent of the shear rate and  $r$  time.

The structure stress  $\tau_s$  which associated with the network structures. So the total stress may be written [3]:

$$\tau = \tau_s + \tau_{A1}. \quad (3)$$

Here,  $S$  is the structure parameter, when the structure of CWS completely breaking down,  $S = S_{min} = 0$ , and when the structure completely built up,  $S = S_{max} = 1$ .

As the fourth item on the model, we assume that the shear process is composed of two reversible processes of structure breakdown and build up. Whenever the structure parameter  $S$  becomes greater than its minimum possible value  $S_{min}$  structure spontaneous is build up, till  $S = 1$ .

Whenever shear work is done on CWS, the structure parameter  $S$  is less than its maximum possible value  $S_{max}$  and the structure is breakdown till  $S = S_{max}$ .

So the rate equation can be describe as following:

$$\frac{ds}{dt} = -K_1(S_{max} - S) + K_2(S - S_{min}). \quad (4)$$

The rate of spontaneous build up of structure is independent of that rate, and the rate of breakdown of structure must be depend on the rate at which shear work is done on CWS. So  $K_1 = k_1 = const$ , and  $K_2 = k_2W$ .

The fifth item is assumed that the breakdown and recovery rate of the structure can reach a dynamic equilibrium when the shear energy transfer to CWS is regular. In this condition the rheological curve which measured by quasi-equilibrium rheological method is equal structure curve. This equal structure curve is assumed can be described using Bingham plastic model, that, is:

$$\tau_{gi} = \tau_{\gamma i} + \mu_{pi} \dot{D}. \quad (5)$$

Taking in account of both (3) and (5), the equal structure eq. of CWS can be written as:

$$\tau = (\tau_0 + \mu \dot{D}) + S(\tau + \mu_1 \dot{D}), \quad (6)$$

at any constant rate of shear, the shear energy transfer of CWS is:

$$W = \int \dot{D} d\tau = \int \dot{D} (\tau_1 + \mu_1 \dot{D}) ds = (\tau_1 + \mu_1 \dot{D}) \dot{D} S. \quad (7)$$

$$K_1 = k_1 W = k_2 (\tau_1 + \mu_1 \dot{D}) \dot{D} S = k_2 (\dot{D}) S. \quad (8)$$

Take eq. (8) into eq. (4), the rate equation changes into that:

$$\frac{ds}{dt} = -k_1(1 - S) + k_2 \dot{D} S^2. \quad (9)$$

So far we established the thixotropic model of CWS:

$$\text{State equation} \quad \tau = (\tau_0 + \mu \dot{D}) + S(\tau + \mu_1 \dot{D})$$

$$\text{Rate equation} \quad \frac{ds}{dt} = -k_1(1 - S) + k_2 (\tau_1 + \mu_1 \dot{D}) \dot{D} S.$$

In this simplest model, there are six constants:

$$\tau_0, \mu_0, \tau_1, \mu_1, k_1, k_2.$$

**Predictions of the model**

We now apply the model to a number of specific cases. These will show that the model does indeed predict the kind of thixotropic phenomena that are actually observed.

1. Equilibrium state: If CWS is sheared at a constant rate  $D$  for a length of time, the breakdown and build up rate of structure can be reached an equilibrium, at this moment, the shear stress trends to a steady value. When CWS in the equilibrium state,  $\frac{ds}{dt} = 0, S = S_{eq}$ , taking that into the rate eq. (9), one can obtained:

$$S_{eq} = \frac{-k_1 + \sqrt{k_1 + 4k_2\dot{D}}}{2k_2\dot{D}}. \tag{10}$$

The value of  $S_{eq}$ , of CWS which temperature and concentration is constant will only be related with the shear rate  $D$ , and decreased with the increasing of shear rate. If  $\dot{D} = 0$ ,  $S_{eq}$  will be equaled one, if the shear rate is high enough,  $S_{eq}$  tends to zero. That is a limit state which the network is completely destroyed. The thixotropic structure will not be affected by increasing the shear rate  $D$  under this condition. The viscosity is decreased to the lowest value and is independent of the shear rate.

2. Under constant shear rate: When applied a constant shear rate on CWS, the initial shear rate is higher, then decreasing gradually and tend to a steady value finally. If  $D = constant$ , that  $K_2(D) = constant$ , solve the rate equations, then yields:

$$S = -\frac{K}{2} + \sqrt{\left(\frac{K}{2}\right)^2 + K \left( \frac{1 + B \exp(-Qt)}{1 - B \exp(-Qt)} \right)}. \tag{11}$$

Where

$$Q = \sqrt{k_1^2 + 4k_1k_2\dot{D}}, \quad K = \frac{k_1}{2k_2\dot{D}}, \tag{12}$$

$$B = \frac{1 + K/2 - \sqrt{K + (K/2)^2}}{1 + K/2 + \sqrt{K + (K/2)^2}} \tag{13}$$

Substitution of eq. (11) into the structure eq. (6), the shear stress at any instant is:

$$\tau = \tau_0 + \frac{A \exp(-Qt)}{1 - B \exp(-Qt)}. \tag{14}$$

$$A = B(\tau_1 + \mu_1\dot{D})\sqrt{K + (K/2)^2}. \quad \frac{ds}{dt} = -k_1(1 - S). \tag{15}$$

From eq. (14) we can see: the shear stress changed with time under constant shear rate is a complicated exponential function and tend to a steady value  $\tau_e$  finally.

3. Recovery of the structure: Supposing that CWS is sheared at constant shear rate and attained an equilibrium state, then is brought to rest. The rate eq (6) can be expressed in the form:

$$\frac{ds}{dt} = -k_1(1-S). \quad (16)$$

Solve this eq. then obtains:

$$\frac{1-S}{1-S_{eq}} = \exp(-k_1 t). \quad (17)$$

From the structure eq. we find that

$$\frac{\tau - \tau_1}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{S - S_{eq}}{1 - S_{eq}} = 1 - \exp(-k_1 t). \quad (18)$$

So if giving a time, there will be a recovery shear stress corresponding to. In order to the extent of recovering. we introduce a parameter  $\lambda_n$ :

$$\lambda_n = 0, \lambda_n = \frac{\tau - \tau_1}{\tau_2 - \tau_1}.$$

If  $\lambda_n = 0$ , the structure Lures have not recovery, if  $\lambda_n = 1$ , the structure completely recovery.

4. Cyclic shearing: If CWS is sheared by a cyclically changed shear rate as in figure (1) a, a series of «screw» can be obtained responding from the flow curve. These curve in general open-ended, but if the shearing is continued to large  $t$  a closed equilibrium loop is obtained as in figure 1 c.

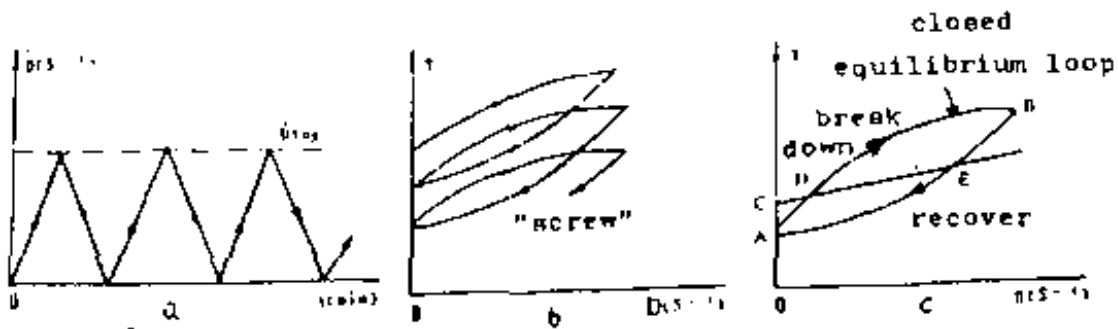


Fig. 1.

- a - The change program of shear rates in cyclic shearing.
- b - The flow curve responding in the cyclically change shear rates.
- c - The steady hysteresis loop formed by circulating many times.

The thixotropic model can explain the form of screw curve theoretically, and testified that the ample and essential conditions of obtaining a closed hysteresis circle are that there are two equilibrium points in the hysteresis curve.

As show in fig (1) c, D, E are two equilibrium point, and ADB is the up curve, and BEA is the down curve. According to eq. (2) we have: [4]

$$\begin{aligned}
 S_E &= S_{Eq} & S_E &= S_{Eq} \\
 S_D &= S_{Deq} & S_D &= S_{Deq} \\
 D, E \text{ point } ds/dt &= 0, f_2(S, \dot{D}) = 0; & D, E \text{ point } ds/dt &= 0, f_2(S, \dot{D}) = 0; \\
 DBE \text{ curve: } ds/dt > 0, f_2(S, \dot{D}) > 0 \quad \dot{D} > 0, S > S_{eq}; & DBE \text{ curve: } ds/dt > 0, f_2(S, \dot{D}) > 0 \quad \dot{D} > 0, S > S_{eq}; \\
 EAD \text{ curve: } ds/dt < 0, f_2(S, \dot{D}) < 0 \quad \dot{D} < 0, S < S_{eq}. & EAD \text{ curve: } ds/dt < 0, f_2(S, \dot{D}) < 0 \quad \dot{D} < 0, S < S_{eq}.
 \end{aligned}
 \tag{19-21}$$

If the periodically changed shear rate time function can be written as:  $Q = t + (n - l)T$ , here, T is the period of the cycles and (n - l) is the number of cycles already completed. On integration of eq. (2), the difference between 3 at the same point t in two consecutive cycles is:

$$S_{n+1}(t) - S_n(t) = \int_{(n-1)T+t}^{nT+t} f_2(S, \dot{D}) dt. \tag{22}$$

If  $S_{n+1}(t)$  identical with  $S_n(t)$ , since  $\dot{D}(t)$  is the same for the cycles, from eq. (1) it follows that:

$$\tau_{n+1}(t) = \tau_n(t)$$

and the equilibrium loop is reached. This requires that:

$$\oint f_2(S, \dot{D}) dt = 0.$$

Equations (20) and (21) show that when S is close to  $S_{eq}$  the DBE curve,  $f_0(S, \dot{D}) > 0$ , in EAD curve,  $f_2(S, \dot{D}) < 0$ . Hence, there exists a  $S(t)$  that would satisfy eq. (22), the existence of equilibrium loop has been testified.

The exact results can be obtained by solving the rest eq. (9) using the computer. Because of the less use of hysteresis loop in describing thixotropy in industry, we didn't make a quantitative solution here.

**The determination of the model parameters.** The established model must be determinate the model parameters by rheological experiments, the method as follows:

First, the recovery experiment could be used, and the results of this test could be used to determinate the structural recovery parameters  $K_I$ . According to the eq. (18), the second step should be the performance of steady shear. The results of this test can be determinate A, B, Q, and through the eq. (14). One could also determinate  $S_{eq}$  and  $K_2(\dot{D})$  through eq. (10).

The third step should be to determinate the parameters  $\tau_0, \tau_1, \mu_0, \mu_1$ . This could be obtained by the equal-structure curve fitting, and the break-down structure parameter K can be obtained by eq. (8). Therefore the six parameters of the model has all determinate. The thixotropic model of which parameters are known can be determinate the shear stress at any time and any shear rate. So the description of the rheology and thixotropy of CWS are given.

**The estimate of CWS thixotropic.** The thixotropic model which parameters are known can be used to estimate the thixotropic amount quantity. The description of thixotropy must be include two aspect. One is the thixotropic process, another is the final effects of thixotropy.

The thixotropic process means the process of structure of thixotropic liquid breakdown with the increasing of shear time under a constant shear rate. This process describe the thixotropic time effects. In order to describe the thixotropic process of CWS, we introduce a non-dimension parameter  $\lambda_t$  called as thixotropic coefficient  $\lambda_t$  can describe as:

$$\lambda_t = \frac{\tau_0 - \tau}{\tau_0 - \tau_e} = \frac{1 - S}{1 - S_{eq}}. \quad (23)$$

Obviously, the physical mean of  $\lambda_t$  is that the ratio of thixotropic amount, at any time to the total thixotropic amount. From eq. (23) one can be seen: is only the simple function of parameter  $S$ . If  $\lambda_t = 0$ ,  $\tau = \tau_0$ , the thixotropic process occur. If  $\lambda_t = 1$ ,  $\tau = \tau_0$  the thixotropic processes end and after that the shear stress will keep constant with the increasing of shear time. The final effects of thixotropic process — that is the estimation of thixotropic amount. We can use equilibrium parameters to describe directly if the temperature and concentration is unchanged.  $S_{eq}$  is the simple function of shear rate. When  $\dot{D} = 0$ ,  $S_{eq} = 1$ , the thixotropic is the most weak and when  $\dot{D} \rightarrow \infty$ ,  $S_{eq} = 0$  and the thixotropic is the most strength. This is a limit state. So we may conclude the single structure parameter  $S$  can give a comprehensive description of the thixotropic.

**Conclusions.** To sum up the theory results of this paper, we can obtained the conclusions as follow:

1. The rheological and thixotropic experiments are verify that CWS is a thixotropic liquid which possess yield stress and which properties changed with time by rule.
2. According to the thixotropic theory of Non-Newtonian liquid, this paper established a thixotropic model which is a simple but can applied in practical

$$\text{structure eq; } \tau = \tau_0 + \mu_0 \dot{D} + s(\tau_1 + \mu_1 \dot{D});$$

$$\text{rate eq; } \frac{ds}{dt} = -k_1(1 - S) + k_2 \dot{D} + S^2;$$

and the six parameters  $\tau_0, \tau_1, \mu_0, \mu_1, k_1, k_2$ , can be determinate by the rheological experiments.

3. Using this model some special thixotropic effects such as equilibrium state, constant shear rate, recovery, and circle shear is calculated and analyzed theoretically.
4. The thixotropic amount is estimated by using a single structure parameter  $S$ .

## REFERENCES

1. Фарбер Т. Е. Гидроаэродинамика / Фарбер Т. Е. – Москва : Постмаркет, 2001. – 560 с.
2. Коваленко А. А. Реометрия / Коваленко А. А., Андрийчук Н. Д., Пилавов М. В. – Луганск : Изд-во ЛГУ им. В Даля, 2016. – 220 с.
3. Сорока С. И. Реология жидкости : учеб. пособие / С. И. Сорока ; Восточноукр. нац. ун-т. – Луганск : Изд-во ВНУ, 2001. – 48 с.
4. Mewis J. Thixotropy – a general review / J. Mewis // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 1979. – Vol. 6, Issue 1. – P. 1-20.

*Received September 24, 2019*



## ТИКСОТРОПИЯ ВОДОУГОЛЬНОЙ СМЕСИ

*А.А. Коваленко, Я.А. Гусенцова, М.В. Пилавов*

В работе представлен, простой, но точный и надежный количественный экспериментальный метод описания тиксотропности ВУС (водуугольной смеси). Этим методом были проведены исследования по тиксотропии четырех разностных видов угля. На основе этого была создана простая тиксотропная модель, которая может быть практически применена. Модель оценивает тиксотропию одним параметром структуры  $S$ , который описывает зависимость тиксотропных свойств в зависимости как от скорости сдвига, так и от времени сдвига.

**Ключевые слова:** тиксотропия, водуугольная смесь, параметр структуры  $S$ .

**Коваленко Алим Алексеевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидрогазодинамики ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», ЛНР, г. Луганск.  
E-mail: azazello102@gmail.com

**Kovalenko Alim Alekseevich**

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department Hydrogazdynamiks of Lugansk Vladimir Dahl National University, LPR, Lugansk.

**Гусенцова Яна Алимовна**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вентиляции, теплогазо- и водоснабжения ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», ЛНР, г. Луганск.

**Kovalenko Alim Alekseevich**

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Hydrogazdynamiks of Lugansk Vladimir Dahl National University, LPR, Lugansk.

**Пилавов Манолис Васильевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вентиляции, теплогазо- и водоснабжения ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», ЛНР, г. Луганск.

**Pilavov Manolis Vasilievich**

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Hydrogazdynamiks of Lugansk Vladimir Dahl National University, LPR, Lugansk.

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

---



УДК 621.437+620.97

### РЕКУПЕРАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИЛОВЫХ АГРЕГАТАХ ГОРОДСКИХ АВТОБУСОВ

©2019 С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков

---

Рассматривается энергетическая эффективность процесса движения городского автобуса категории М<sub>3</sub> в условиях стандартизированного ездового цикла при оснащении маховичным накопителем кинетической энергии его традиционной механической ступенчатой трансмиссии. Выполнено обоснование конструктивных параметров такого накопителя для автобуса А09202 «Богдан» - коэффициента полезного действия, нагрузочно-скоростного режима работы и т.д. Основное внимание в работе уделено оценке топливной экономичности автотранспортного средства выбранной категории в условиях ездового цикла при действующем механизме аккумулирования кинетической энергии, в основе которого лежит принцип функционирования системы KERS.

**Ключевые слова:** силовой агрегат, автобус, ездовой цикл, путевой расход топлива, система рекуперации кинетической энергии, маховик, вариатор, процесс движения, коробка передач, трансмиссия.

---

**Введение.** Снижение расхода топлива и выброса вредных веществ автотранспортными средствами в последние 50 лет стало одной из актуальных проблем. Постоянное ужесточение экологических требований в связи с глобальным загрязнением планеты, а также обострение общемирового энергетического кризиса активизировали в последние годы столетия поиск новых решений.

Основными показателями поршневых ДВС, которые обеспечивают им преимущество перед другими типами силовых установок, к настоящему времени являются: энергетическая эффективность, низкая стоимость, высокая удельная мощность, соответствие международным требованиям по экологии.

Именно эти показатели поршневых ДВС позволяют рассматривать их в ближайшей перспективе как основной вид источников энергии для автотранспортных средств (АТС). Ужесточение требований по экологии требует, в первую очередь, внедрения новых типов внутригородского пассажирского транспорта. В настоящее время много внимания уделяется разработке и внедрению электробусов. Однако значительный ряд недостатков, присущих электромобилям и автомобилям с гибридными силовыми установками не позволяют в данное время предполагать их преобладающее значение в автотранспортной отрасли ближайшего будущего.

Новым направлением в развитии автомобильных силовых установок явилось создание машиностроительной компанией Torotrak новой автомобильной трансмиссии, применение которой, как ожидается, позволит ощутимо снизить количество потребляемого топлива, уменьшить вредные выбросы в окружающую среду, улучшить технические характеристики и эксплуатационные качества автомобилей.

Система позволяет при торможении автомобиля запасать кинетическую энергию с помощью специального устройства, включающего маховичный накопитель. В

дальнейшем эта накопленная энергия добавляется к энергосиловому потоку, который развивается основным двигателем. Такая система особенно эффективна при движении в городских условиях, характеризующихся частыми остановками и разгонами АТС – в том числе и городских автобусов.

Целью настоящей работы является исследование эффективности рекуперации механической энергии на городском автобусе категории М3.

Таким образом, в задачи исследований входит разработка математической модели системы рекуперации механической энергии для автобуса, исследование ее в условиях соответствующего стандартизованного городского ездового цикла [1]. Помимо этого рассмотрены особенности работы системы рекуперации и дана количественная оценка ее эффективности на примере автобуса с дизельным двигателем.

Методы исследований включают математическое моделирование процессов движения автобуса на режимах разгона и торможения в условиях городского ездового цикла на дороге, определение скоростных характеристик крутящего момента и удельного расхода топлива двигателя внутреннего сгорания. Для нахождения целевых функций показателей топливной экономичности автобуса для городского цикла применено численное интегрирование.

**Основная часть.** Система KERS [2-4] (Kinetic Energy Recovery System) с маховиком возвращает, как указано в этих работах, до 70% энергии торможения, что превышает параметры систем, с использованием электрических обрабатываемых машин.

Фирма Volvo разработала систему кинетической рекуперации энергии для легковых автомобилей на основе британской системы Flywheel KERS. Накопителем механической энергии систем KERS является цилиндрический маховик, выполненный из волоконного углепластика массой около 6 кг и диаметром 200 мм [3,4]. Его частота вращения изменяется от 64500 до 32250 мин<sup>-1</sup>. Для уменьшения потерь на трение при вращении пространство в кожухе маховика вакуумируется. Управляемый торковый двухступенчатый быстродействующий вариатор Torotrak CVT изменяет передаточное отношение между маховиком и трансмиссией от 6:1 до 1:1. Указывается, что для седана Volvo S60 T5, оснащённого ДВС эффективной мощностью 258 л.с., сокращение среднего расхода топлива составило 25%, улучшилась динамика АТС.

В процессе ускорения автомобиля маховик отдаёт свою энергию колёсам, развивая мощность – до 60 кВт на короткое время. Одно из преимуществ системы – малая масса всего устройства рекуперации – около 50 кг. ДВС, который передает крутящий момент на колеса, отключается, как только начинается процесс торможения. Энергия маховика может использоваться для начала движения с места или для поддержания движения автомобиля с постоянной скоростью.

Городской автобус является одним из лучших транспортных средств, для которого применение системы KERS представляется наиболее эффективным. Значительная масса, низкое аэродинамическое сопротивление ввиду небольшой скорости движения и большое количество остановок обеспечивают большой запас кинетической энергии маховика. В условиях современного города с постоянным движением в пробках, с частым троганием с места и торможением системы KERS весьма перспективны.

Модель, выбранная для анализа, была применена к расчетам движения городского автобуса массой 8500 кг, с дизелем мощностью 110 кВт. Скорость вращения маховика составляла от 12000 мин<sup>-1</sup> до 24000 мин<sup>-1</sup>, поэтому его момент инерции был увеличен до 0.323 кг\*м<sup>2</sup>, чтобы обеспечить аккумуляцию кинетической энергии автобуса при замедлении от скорости 48 км/ч. Испытания гибридного автобуса Volvo показали, что

коэффициент сохранения энергии достигает 75 % [3,4].

В Российской Федерации, в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54810-2010, устанавливается такой показатель топливной экономичности АТС как расход топлива в городском ездовом цикле на дороге, его схема для городских автобусов представлена на рис.1. В проведенных исследованиях этот цикл принят для расчетов параметров движения и расхода топлива автобусом А09202 «Богдан» [5] без системы рекуперации энергии, а также таких автобусов, оборудованных системой рекуперации.

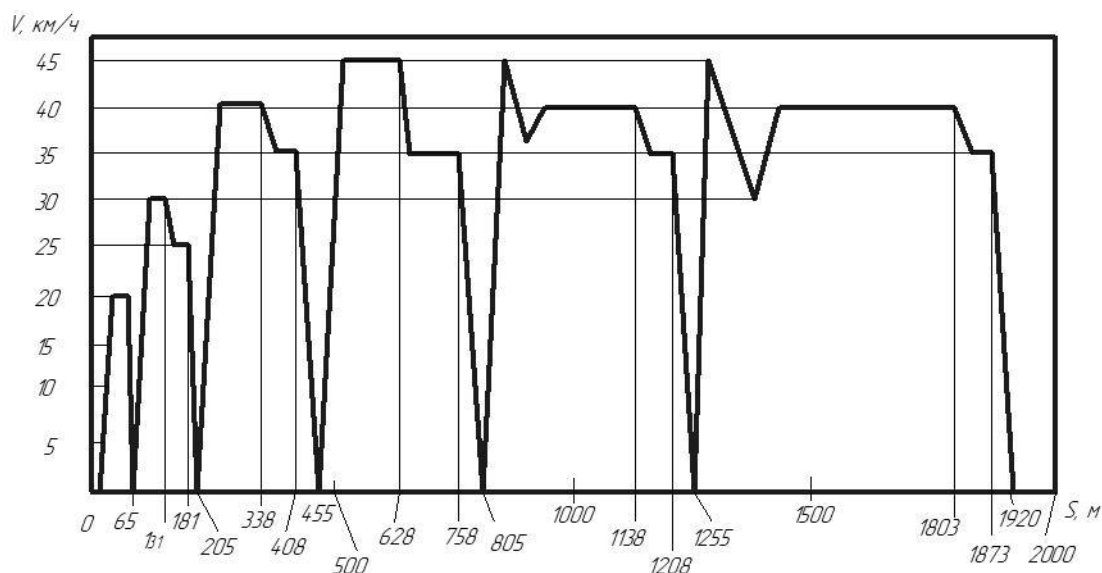


Рис. 1. Схема городского ездового цикла на дороге для автобусов

При движении по этому циклу не регламентируется время движения на участках и номера включаемых передач. Это обусловлено широкими диапазонами масс и мощностей двигателей. Поэтому порядок выбора параметров движения в расчетах может быть достаточно свободным, а сами расчеты движения транспортных средств по этим циклам являются в значительной мере ориентировочными, поскольку в стандарте не установлены значения ускорений и замедлений. В то же время определенная свобода в выборе параметров движения дает возможность оценки различных вариантов режимов движения с целью оптимизации какого-либо из этих параметров. Оптимизируемыми параметрами (целевыми функциями) могут выступать минимальный расход топлива в цикле, минимальное время прохождения всего пути цикла, ограничения по значениям ускорений и замедлений при движении и др.

В системе рекуперации механической энергии с использованием маховика часть накопленной энергии безвозвратно теряется в процессах его разгона-замедления, поскольку вариаторы обладают сравнительно невысоким КПД в сравнении с традиционными коробками передач, содержащими зубчатые передачи.

Полагая, что КПД одной ступени вариатора  $\eta_{ст.вар.}$  составляет 0.85 получаем, что в процессе разгона маховика (накопления энергии) КПД процесса для двухступенчатого вариатора с учетом общих потерь в подшипниках ( $\eta_{подш.}=0.98$ ) определится как:

$$\eta_{нак} = \eta_{ст.вар.}^2 \cdot \eta_{подш.} = 0.85^2 \cdot 0.98 = 0.708. \quad (1)$$

Принимая КПД процесса отдачи энергии  $\eta_{отд.}$  таким же, как и  $\eta_{нак.}$  получаем, что в целом КПД процедуры накопления-отдачи системы составит:

$$\eta_{сумм.} = \eta_{нак.} \cdot \eta_{отд.} = 0.708^2 = 0.501. \quad (2)$$

Полученное значение КПД процесса отдачи энергии принято в расчетах процесса движения автобуса с использованием системы рекуперации в городском цикле. Как уже отмечалось, фирма Volvo в ходе совершенствования систем KERS добилась значений КПД до 0.75.

Кинетическая энергия автобуса А09202 «Богдан» с полной массой 8230 кг при движении со скоростью 40 км/ч составляет 508 кДж, эта энергия принята в качестве исходного расчетного значения. Полностью использовать ее практически невозможно.

Приняв КПД процесса рекуперации энергии  $\eta_{рек.} = 0,5$ , получаем, что в целом энергия вращающегося маховика, которая может быть использована для движения автобуса в ускоренном режиме, составляет 254 кДж. Отсюда следует, что полная кинетическая энергия маховика при его вращении с максимальной угловой скоростью для автобуса, двигающегося со скоростью 40 км/ч, должна превышать 508 кДж.

Полагая, что для движения автобуса может быть использовано 75% максимальной кинетической энергии маховика, получаем, что его полная энергия должна составить:

$$E_{пол.} = \frac{E_{max}}{0.75} = \frac{508}{0.75} = 678 \text{ кДж}. \quad (3)$$

Накопители кинетической энергии фирмы «Volvo» обеспечивают аккумуляцию до 860 кДж механической энергии. Поэтому такой накопитель может обеспечить движение автобуса «Богдан» в городском ездовом цикле для автобусов [1].

Оценка значений КПД процесса накопления-отдачи механической энергии является, безусловно, приближенной, поскольку на эту величину оказывает влияние и КПД трансмиссии, главной передачи, нагрузочно-скоростной режим работы вариатора, а также дополнительные затраты энергии на изменение его рабочих положений, на обеспечение вакуумирования и смазку деталей. Но, применив указанную систему рекуперации с энергией маховика 860 кДж, следует ожидать, что использование даже 60% этой энергии полностью обеспечит движение автобуса в городском ездовом цикле.

Блок управления силовым агрегатом должен предусматривать возможность передачи энергии маховика при резком увеличении скорости для обгона. Для исключения дополнительных нагрузок на механизм коробки передач целесообразным представляется соединение механизмов системы KERS с карданным валом либо редуктором заднего моста. Тогда появляется возможность аккумуляции энергии при движении на нейтральной передаче – например, на протяженных спусках.

Часть этой энергии может быть получена маховиком (путем сообщения ему необходимой частоты вращения) перед выездом на маршрут. Остальное приращение энергии – до 508 кДж – в процессе снижения скорости автобуса и его торможении, а также при движении на спусках.

Анализ параметров городского испытательного цикла для автобусов массой более 3.5 т показывает, что значительную часть пути (~900 м) они проезжают со средним значением скорости 40 км/ч. При длительном движении с постоянной скоростью система рекуперации практически не работает, так как ее маховик накапливает кинетическую энергию преимущественно при замедлении (торможении) транспортного средства. Поэтому расчет для участков с установившейся скоростью движения

выполнен как для автобуса, двигающегося с постоянной скоростью без системы рекуперации.

Расчет параметров движения автобуса и его силовой установки проводился с использованием созданных в ДонНАСА программ расчетов движения автомобилей на неустановившихся режимах в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54810-2010. Он дал возможность количественно оценить расход топлива при движении автобуса в городском ездовом цикле, как без системы рекуперации механической энергии, так и с использованием такой системы. Расход топлива на каждом участке цикла определялся численным интегрированием с учетом характеристик двигателя [6].

Результаты показали, что при отсутствии системы рекуперации потребление топлива для автобуса «Богдан» за полный городской цикл составляет 344 г. Это соответствует путевому расходу топлива 17.91 кг на 100 км. Расчеты расхода топлива с применением системы рекуперации дают его уменьшение до 271 г. Таким образом, экономия топлива за один городской цикл составляет 67 г, что соответствует относительному снижению на 21%.

Полученный результат выглядит, на первый взгляд, весьма обнадеживающим. Но, необходимо отметить, что они не учитывают потребление топлива двигателем при остановках автобуса для посадки и высадки пассажиров, неполное использование системы рекуперации при торможении, т.к. водители, особенно малоквалифицированные, могут использовать для замедления и торможения автобуса основную тормозную систему. Помимо этого проявляется расход топлива двигателем в процессе переключения передач, движение с отклонениями от стандартизованного городского цикла, как в сторону увеличения скорости, так и ее снижения.

Исследования показали, что если провести расчет расхода топлива автобусом без учета его движения с установившейся скоростью, то оказывается, что расход на участках разгона и торможения составляет 246 г без применения системы рекуперации. В то же время использование накопителя механической энергии позволяет снизить расход топлива на этих участках до 174 г, т.е. снижается на 29.3%.

Этот результат в большей мере, чем предыдущий, характеризует эффективность рекуперации. Такой режим движения соответствует перемещению при дорожных заторах. В данном случае система рекуперации наиболее эффективна.

**Выводы.** В целом полученные результаты выглядят весьма оптимистичными. Анализируя результаты в целом, можно констатировать, что использование системы рекуперации наиболее ярко проявляется при движении автобуса именно в городском ездовом цикле с частыми разгонами и торможениями.

1. Выполненный анализ конструкций систем рекуперации механической энергии автотранспортными средствами позволил принять для исследований механизм с использованием вращающихся маховиков в качестве накопителей энергии.

2. Проведенные исследования позволили разработать методику расчета параметров движения автобуса и работы его силовой установки в режиме городского цикла.

3. Установлено, что применение системы рекуперации механической энергии дает возможность снизить потребление топлива в стандартизованном городском ездовом цикле на 21%.

4. Результаты исследований показали, что в режимах движения с частыми остановками автобуса устройства регенерации еще более эффективны и позволяют снизить относительный расход топлива на величину до 29%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 54810-2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. – Введ. 2012–09–01. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 28 с.
2. Гусаков С. В. Расчетные исследования автомобильной силовой установки с системой рекуперации энергии / Гусаков С. В., Марков В. А., Бехджуйан Х. // Известия высших учебных материалов. Машиностроение. – 2016. – № 2 (671). – С. 20-27.
3. Испытания, проведенные VOLVO CARS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.media.volvocars.com/ru/ru-ru/media/pressreleases/48800>, свободный. – Загл с экрана. – Дата обращения: 05.03.2018.
4. Volvo уменьшит расход топлива с помощью маховика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.facepla.net/the-news/eco-transportation-mnu/1374-flywheel-kers.html>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения: 12.12.2017.
5. Богдан А092. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Богдан\\_А092](https://ru.wikipedia.org/wiki/Богдан_А092), свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения: 02.02.2018.
6. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Д. Н. Вырубов, Н. А. Иващенко, В. И. Ивин и др. – Москва : Машиностроение, 1983. – 372 с.

*Поступила в редакцию 13.09.2019 г.*

## RECOVERY OF THE MECHANICAL ENERGY IN THE POWER UNITS OF THE URBAN BUSES

*S.A. Gorozhankin, N.V. Savenkov*

The energy efficiency in a standardized driving cycle of a city bus category M<sub>3</sub> was investigated. The study was performed for a bus, equipped with a traditional mechanical manual transmission and an additional flywheel drive of kinetic energy. Also the justification of parameters of this drive is executed. The bus A09202 “Bogdan” was taken as an example. The efficiency and load-speed mode of the kinetic energy storage are considered. The main attention is paid to the assessment of the fuel economy of the bus in the driving cycle with the current mechanism for the accumulation of kinetic energy. The study was performed on the example of the KERS system.

**Keywords:** power unit, bus, driving cycle, fuel consumption, kinetic energy recovery system, flywheel, variator, driving process, gearbox, transmission.

### **Горожанкин Сергей Андреевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации и сервиса автомобилей, технологических машин и оборудования ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
ДНР, г. Донецк  
E-mail: gormar52@gmail.com

### **Gorozhankin Sergey Andreevich**

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Technical Operation and Service of Automobile, Technological Machines and Equipment of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture,  
DPR, Donetsk.

### **Савенков Никита Владимирович**

кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации и сервиса автомобилей, технологических машин и оборудования ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
ДНР, г. Донецк  
E-mail: n.v.savenkov@donnasa.ru

### **Savenkov Nikita Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Department of Technical Operation and Service of Automobile, Technological Machines and Equipment of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture,  
DPR, Donetsk.

УДК 532.517

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЕЛИЧИНУ СНИЖЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ТРЕНИЯ В РАСТВОРАХ ВМП И МПАВ

© 2019 И.А. Золотарёва, А.П. Симоненко, Т.К. Гучмазова

Гидродинамически-активные высокомолекулярные полимеры (ВМП) и мицеллообразующие поверхностно-активные вещества (МПАВ) имеют большие перспективы практического использования. Установление связи снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения (ГСТТ) с величиной характеристической вязкости в водных растворах ВМП, точкой Крафта и наличием в турбулентных потоках растворов МПАВ асимметричных мицелл Мак-Бена позволяет сделать правильный выбор гидродинамически-активных добавок для достижения максимального гидродинамического эффекта в заданных условиях, в т.ч. и в требуемом диапазоне температур.

**Ключевые слова:** температура, снижение гидродинамического сопротивления турбулентного трения, высокомолекулярные полимеры, мицеллообразующие поверхностно-активные вещества.

**Растворы высокомолекулярных полимеров [1-3].** В процессе исследований и при практическом использовании эффекта Томса часто приходится сталкиваться с фактами проявления различной гидродинамической активности одними и теми же полимерами в разнообразных физико-химических условиях. Причиной этому, как показали многочисленные исследования, является изменение молекулярных характеристик полимеров в растворе в зависимости от внешних условий и состава жидкостей, в которых они растворены. Знание этих закономерностей позволит сделать правильный выбор полимеров для достижения максимального гидродинамического эффекта в заданных условиях.

Одной из основных характеристик состояния полимера в растворе является характеристическая вязкость. Для предельно разбавленных растворов (в которых и наблюдается снижение гидродинамического сопротивления трения) характеристическая вязкость  $[\eta]$  определяется соотношением:

$$[\eta] = \lim_{C \rightarrow 0} \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 C}, \quad (1)$$

где  $\eta$ ,  $\eta_0$  – вязкость раствора и растворителя соответственно; а  $C$  – концентрация исследуемого полимера в растворе.

На практике характеристическую вязкость определяют экстраполяцией величины  $\frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 C}$  на нулевую концентрацию, используя полученные экспериментальным путем значения  $\eta$  и  $\eta_0$ .

Согласно Флори характеристическая вязкость связана с размерами макромолекулярного клубка следующим соотношением:

$$[\eta] = \Phi_0 \frac{(\bar{h}^2)^{3/2}}{M}, \quad (2)$$

где  $\Phi_0$  – константа Флори,  $\bar{h}^2$  – среднеквадратичное расстояние между концами полимерной цепи,  $M$  – молекулярная масса полимера. В соответствии с приведенным уравнением можно сделать вывод о том, что об изменении размеров макромолекулярных клубков можно судить по характеристической вязкости полимерных растворов.

Автором работы [4] проведены комплексные исследования по определению влияния



температуры на характеристическую вязкость и величину эффекта снижения гидродинамического сопротивления трения в водных растворах ПЭО различных молекулярных масс. При этом, в процессе проведения исследований, особое внимание было уделено выяснению влияния качества растворителя полимера на конформационное состояние его макромолекул в растворе. Главная задача исследований сводилась к выяснению влияния температуры на структуру воды, которая должна определять величины характеристической вязкости и гидродинамического сопротивления приготовленных на ее основе растворов.

На рис. 1 приведена зависимость величины коэффициента гидродинамического сопротивления трения  $\lambda$  от числа Рейнольдса для водных растворов ПЭО с молекулярной массой  $M = 2,9 \cdot 10^6$ . Видно, что с понижением температуры эффективность воздействия добавок возрастает. Кривая 1, соответствующая зависимости  $\lambda$  от числа  $Re$  при температуре раствора равной  $18^\circ\text{C}$  лежит значительно ниже аналогичной кривой, полученной при температуре  $75^\circ\text{C}$  (кривая 5).

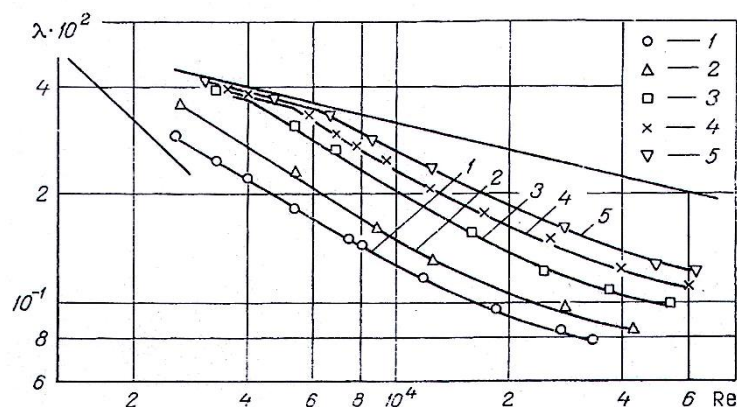


Рис. 1. Зависимость величины коэффициента гидродинамического сопротивления трения  $\lambda$  от числа Рейнольдса  $Re$  при различных температурах. Кривые 1, 2, 3, 4 и 5 соответствуют температуре растворов  $18,0$ ;  $38,5$ ;  $57,0$ ;  $66,0$  и  $75^\circ\text{C}$ . Данные работы [4]

Такое значительное уменьшение величины эффекта снижения гидродинамического сопротивления можно объяснить следующим образом. Макромолекулярная цепь ПЭО содержит эфирные кислороды, между которыми образуются водородно-связанные мостики из трех молекул воды, стабилизирующие и конформацию макромолекулярной цепи в растворе. Повышение температуры приводит к разрыву водородных связей, мостики разрушаются, и макромолекула сжимается, что приводит к уменьшению размеров полимерного клубка. Проверка описанного механизма действия структуры растворителя на конформацию макромолекул была проведена автором работы [4] численным моделированием методом Монте-Карло и показано, что водородно-связанные мостики стабилизируют максимально развернутую конформацию макромолекулярной цепи ПЭО в водном растворе.

Увеличение снижения ГСТТ с понижением температуры также наблюдается и в водных растворах полиакриламида.

**Растворы мицеллообразующих поверхностно-активных веществ [1, 3, 5].** Критическая концентрация мицеллообразования (ККМ) — важная физико-химическая характеристика. Она показывает склонность МПАВ к образованию мицеллярных структур и зависит как от особенностей молекулярного строения МПАВ, так и от внешних факторов: температуры, наличия в растворе электролитов, полярных

органических веществ и т. д.

Критические концентрации мицеллообразования (ККМ<sub>1</sub>, ККМ<sub>2</sub> и т. д.) могут быть определены по изменению объемных (или поверхностных) свойств растворов при повышении в них концентрации МПАВ. При ККМ резко изменяется ход кривых концентрационной зависимости большинства физико-химических характеристик - поверхностного натяжения, электропроводности, светорассеяния, вязкости и др.

ККМ<sub>1</sub> и ККМ<sub>2</sub> в растворах ионогенных МПАВ могут быть определены по измерению концентрационной зависимости электропроводности. Подвижность отдельных ионов заметно отличается от подвижности агрегатов из них (мицелл), поэтому при ККМ происходит резкое изменение этой зависимости. На рис. 2 приведены результаты измерения величины обратной эквивалентной электропроводности пальмитата натрия C<sub>15</sub>H<sub>31</sub>CONa (кривая 1), как функции от его концентрации в водном растворе.

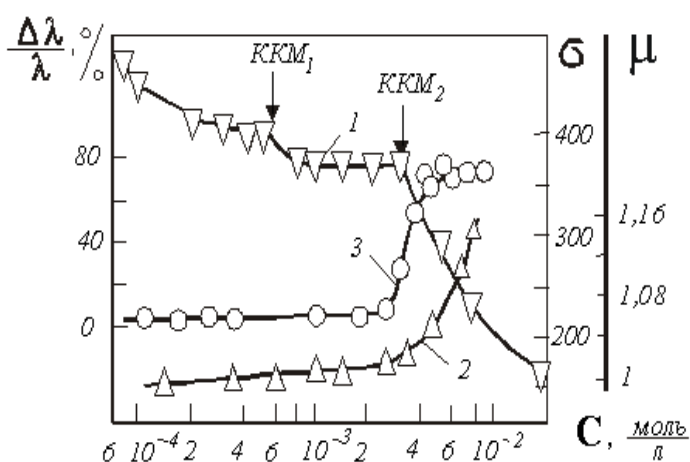


Рис. 2. Зависимости величины обратной электропроводности  $\sigma$  (кривая 1), относительной вязкости  $\mu$  (кривая 2) и величины эффекта снижения гидродинамического сопротивления трения  $\Delta\lambda/\lambda$  (кривая 3) от концентрации пальмитата натрия  $C$  в водном растворе

растворе пальмитата натрия сферических мицелл Гартли. При ККМ<sub>2</sub> на кривой  $\sigma = f(C)$  наблюдается второй, более резкий излом. Он связан с изменением степени агрегации молекул МПАВ, укрупнению мицелл и изменению их формы. При этом в растворе образуются анизометрические мицеллярные структуры — палочкообразные и пластинчатые мицеллы, которые заряжены слабее сферических из-за меньшей диссоциации МПАВ при больших концентрациях, а также обладают меньшей подвижностью в электрическом поле по сравнению с мицеллами Гартли. Оба эти фактора и приводят к резкому снижению электропроводности растворов при ККМ<sub>2</sub>.

В работе [6] подчеркивается, что в области малых концентраций (выше ККМ<sub>1</sub>, но меньше ККМ<sub>2</sub>) мицеллы МПАВ всегда симметричны, сохраняют сфероидальную форму и равномерно покрыты по поверхности гидратированными полярными группами. Это означает, что сферические мицеллы вполне стабилизированы. Их межфазное натяжение — удельная свободная поверхностная энергия на границе с окружающей растворителем — очень близко к нулю. Поэтому они не могут взаимодействовать друг с другом, образовывать анизометрические цепочки или пространственные сетки. Это легко обнаруживается реологическими методами. Вязкость таких коллоидных систем, в

Характер кривой вблизи ККМ<sub>1</sub> указывает на изменение состояния молекул растворенного вещества. Наблюдающийся спад кривой после ККМ<sub>1</sub> объясняется тем, что образующиеся мицеллы хотя и переносят ток, но, из-за большого размера, менее подвижны в электрическом поле, чем неагрегированные ионы. Кроме этого, сильное электростатическое притяжение со стороны заряженных мицелл связывает часть противоионов на их поверхности. Такая блокировка электрических зарядов также уменьшает электропроводность. ККМ<sub>1</sub>

соответствует появлению в

широком интервале не слишком больших градиентов скорости, подчиняется уравнению Эйнштейна, линейно возрастая с концентрацией МПАВ в растворе. Это хорошо согласуется в области концентраций до  $ККМ_2$  с измеренной концентрационной зависимостью относительной вязкости водного раствора пальмитата натрия (кривая 2 на рис. 2). При дальнейшем увеличении концентрации, выше второй критической концентрации мицеллообразования ( $ККМ_2$ ), мицеллы пальмитата натрия становятся все более асимметричными и вызывают появление ярко выраженной аномалии вязкости.

Это связано с превращением сфероидальных мицелл в асимметричные пластинчатые мицеллы, ориентация которых и вызывает отклонение от истинно вязкого течения. Следовательно, можно утверждать, что при  $ККМ_2$  в растворе появляются анизометрические мицеллы.

Интересным, с теоретической и практической точек зрения, является вопрос о том, каким образом мицеллообразование в растворах МПАВ связано со снижением гидродинамического сопротивления трения. С целью установления корреляции между снижением ГСТТ и мицеллярной природой растворов была исследована зависимость величины эффекта  $\Delta\lambda/\lambda$  от концентрации пальмитата натрия в его водном растворе (кривая 3). Величину эффекта снижения ГСТТ определяли по формуле:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left(1 - \frac{\tau_p^2}{\tau_b^2} \cdot \frac{\Delta\rho_p}{\Delta\rho_b}\right) \cdot 100\%. \quad (3)$$

Здесь  $\tau_p$ ,  $\tau_b$  — времена истечения по трубке равных объемов раствора и растворителя (воды) соответственно;  $\Delta\rho_p$ ,  $\Delta\rho_b$  — перепады давления на контрольном участке трубки при течении раствора и растворителя.

Из рис. 2 видно, что величина эффекта снижения ГСТТ начинает проявляться при  $ККМ_2$ . Затем, в узкой области увеличения концентрации пальмитата натрия в растворе, величина эффекта достигает своего максимального значения.

В качестве добавок МПАВ, эффективно снижающих ГСТТ воды, могут быть использованы промышленные пасты метаупон и диталан OTS, максимальное снижение сопротивления турбулентного трения в водных растворах которых достигается в присутствии 8% вес. и 3% вес. хлористого натрия, соответственно. Метаупон представляет собой пасту, основным поверхностно-активным веществом которой является  $\beta$ -[N-метил N-олеоил] этилсульфонокислоты натриевая соль. Паста содержит: поверхностно-активного вещества 52,1% вес., хлористого натрия 10% вес., едкого натра — 0,5% вес., воды — 37,4% вес.

На рис. 3 а, б, в качестве примера, приведены зависимости относительной вязкости  $\mu$  и величины эффекта снижения сопротивления  $\Delta\lambda/\lambda$  от концентрации метаупона при различных концентрациях хлористого натрия в растворе. В качестве растворителя использовалась дистиллированная вода, все опытные данные определяли при температуре 40° С. Видно, что и в растворах метаупона эффект снижения ГСТТ начинает проявляться при  $ККМ_2$ , которая определяется точкой излома на концентрационных кривых  $\mu=\mu(C)$ . Кроме этого, степень нарастания эффекта наибольшая для растворов, содержащих 8% вес. хлористого натрия. Уменьшение концентрации этого электролита приводит к снижению гидродинамической эффективности раствора. При концентрациях хлористого натрия 2,5% и ниже не наблюдается увеличения вязкости раствора и проявления в нём снижения ГСТТ.

Результаты экспериментальных исследований зависимости величин коэффициента гидродинамического сопротивления  $\lambda$  от числа Рейнольдса показывают, что для каждой концентрации МПАВ в растворах существует свой диапазон чисел  $Re$ , в котором проявляется эффект снижения гидродинамического сопротивления. При этом следует заметить, что

увеличение концентрации МПАВ в растворах расширяет этот диапазон и смещает его в область больших чисел  $Re$ . В качестве примера, на рис. 4 приведены кривые зависимости чисел Рейнольдса, соответствующих числам  $Re$ , при которых начинает проявляться эффект снижения ГСТТ ( $Re_{nop}$ ), достигает максимума ( $Re_{max}$ ) и исчезает ( $Re_{enp}$ ) в результате разрушения анизометричных мицелл, от концентрации метаупона  $C, \%$  вес. в 5%-ном водном растворе хлористого натрия.

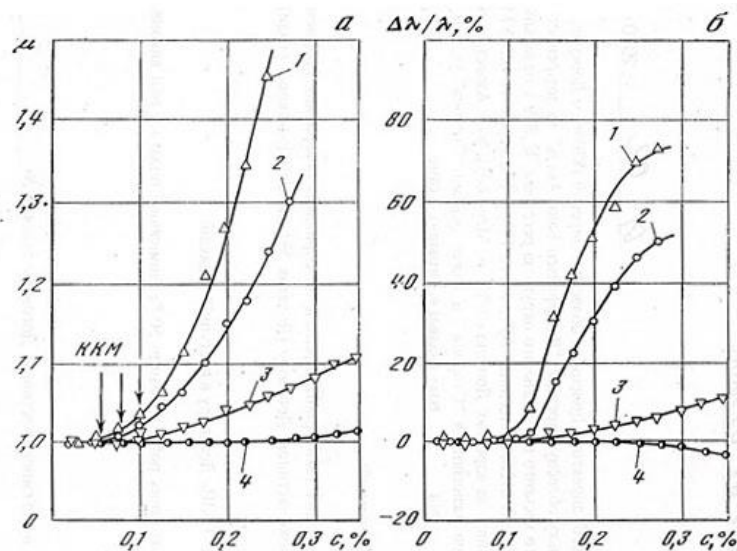


Рис. 3. Зависимость относительной вязкости  $\mu$  (а) и величины эффекта снижения ГСТТ  $\Delta N/N, \%$  (б) от концентрации метаупона  $C$ . Содержание NaCl в растворах для 1-4 составляет  $C=8;6;4$  и  $2,5\%$  соответственно.

Специальными исследованиями, на примере натриевых солей лауриновой, миристиновой, пальмитиновой и стеариновой кислот, установлена температурная область проявления эффекта снижения ГСТТ (рис. 5). Она находится между кривой, которая соединяет соответствующие для использованных МПАВ точки Крафта (кривая 1) и кривой верхних температур (кривая 2), при которых разрушаются анизометрические мицеллы.

Полученные результаты со всей очевидностью свидетельствуют о том, что эффект снижения гидродинамического сопротивления в растворах МПАВ обусловлен возникновением в них анизометрических мицеллярных структур. С точки зрения снижения ГСТТ это позволяет сформулировать следующую гипотезу. В турбулентном потоке со сдвигом под влиянием градиента средней скорости анизометрические мицеллы ориентируются большей осью в направлении течения. Наличие преимущественной ориентации мицелл приводит к неравномерному поглощению турбулентной энергии по разным направлениям и к возникновению дополнительной анизотропии турбулентного переноса. Для пульсационного турбулентного движения направление по нормали к стенке будет более энергоемким, что можно интерпретировать как увеличение вязкости в этом направлении. Повышенная вязкость уменьшает интенсивность пульсаций скорости по нормали к стенке и, следовательно, турбулентного переноса импульса, что приводит к снижению ГСТТ в потоках с добавками МПАВ.

По критическим концентрациям мицеллообразования могут быть рассчитаны свободная энергия, энтальпия и энтропия мицеллообразования. Следовательно, появляется возможность термодинамического подхода к описанию эффекта снижения ГСТТ жидкостей с добавками МПАВ.

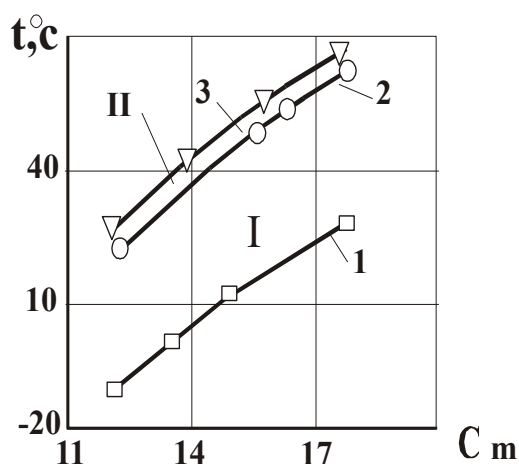


Рис. 4. Кривые зависимости значений  $Re_{пор}$  (1),  $Re_{max}$  (2) и  $Re_{пер}$  (3) от концентрации метаупона  $C, \% \text{ вес.}$  в водных растворах. Содержание хлористого натрия в растворах – 5% вес. Числа  $Re_{пор}$ ,  $Re_{max}$  и  $Re$  рассчитаны по вязкости воды

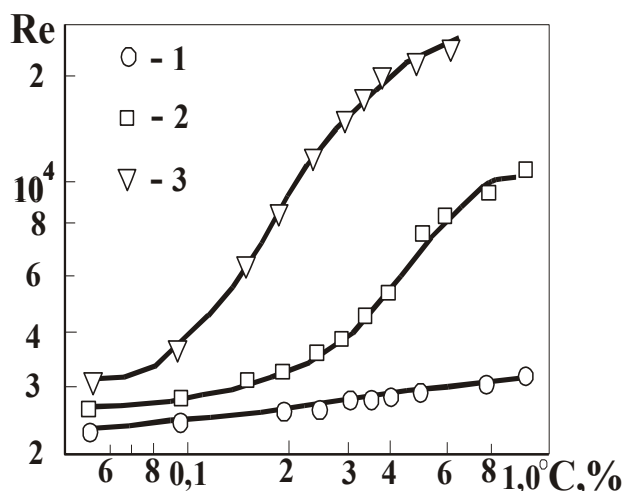


Рис. 5. Зависимость температурной области проявления эффекта снижения ГСТТ в водных растворах натриевых солей карбоновых кислот от длины их углеводородных радикалов  $C_m$ . 1,2,3 – кривые для точек Крафта, максимального проявления эффекта снижения ГСТТ и верхней предельной температуры существования эффекта

**Выводы.** Установление связи снижения ГСТТ с величиной характеристической вязкости в водных растворах ВМП, точкой Крафта и обеспечением наличия в турбулентных потоках растворов МПАВ ассиметричных мицелл Мак-Бена позволяет целенаправленно проводить выбор гидродинамически-активных добавок для снижения гидравлических потерь в напорных трубопроводах в требуемых условиях, в т.ч. и в заданном диапазоне температур.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симоненко А. П. Гидродинамически-активные композиции на основе полимеров и поверхностно-активных веществ для решения проблем экологической безопасности и энергосбережения : дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.01 / А. П. Симоненко. – Донецк, 2013. – 397 с.
2. Основные закономерности эффекта Томса и влияние различных факторов на его величину / А. П. Симоненко, Н. А. Дмитренко, П. В. Асланов, Н. В. Быковская // Вестник Автомобильно-дорожного института ДонНТУ. – 2016. – № 2 (19). – С. 66-73.
3. Проблемы экологии и техногенно-экологической безопасности : [монография] / [А. Б. Ступин и др. ; под общ. ред. Ступина А. Б.]; Донец. нац. ун-т. - Донецк : ДонНУ, 2010. – 503 с.
4. Торяник А. И. Молекулярные аспекты снижения гидродинамического сопротивления добавками полимеров / А. И. Торяник // Физическая гидродинамика : сб. науч. тр. / отв. ред. И. Л. Повх. – Донецк : ДонГУ, 1990. – С. 26-32.
5. 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 : Изд-во Южного федерального университета, 2016. – Т. 1 : Физико-математические, технические науки и экология / под общ. ред. проф. С. В. Беспаловой. – С. 191-194.
6. Ступин А. Б. Гидродинамически-активные композиции в энергосбережении и экологии / А. Б. Ступин, А. П. Симоненко, П. В. Асланов. – Донецк : ДонГУ, 1999. – 240 с.

Поступила в редакцию 23.09.2019 г.

**THE INFLUENCE OF THE TEMPERATURE ON THE REDUCTION OF THE  
HYDRODYNAMIC RESISTANCE OF TURBULENT FRICTION IN SOLUTIONS  
OF HMWP AND MFS**

*I.A. Zolotaryova, A.P. Simonenko, T.K. Guchmazova*

Hydrodynamically active high molecular weight polymers (HMPs) and micelle-forming surfactants (MPAS) have great prospects for practical use. Establishing a connection between the decrease of the hydrodynamic resistance of turbulent friction (HSTT) and the characteristic viscosity in aqueous HMP solutions, the Kraft point, and the presence of asymmetric McBen micelles in turbulent flows of MPA solutions allows to make the right choice of hydrodynamically active additives to achieve the maximum hydrodynamic effect under given conditions, including and in the required temperature range.

**Keywords:** temperature, decrease in hydrodynamic drag of turbulent friction, high molecular weight polymers, micelle-forming surfactants.

**Золотарёва Ирина Александровна**

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

**Zolotaryova Irina Aleksandrovna**

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

**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 Petrovich**

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.

**Гучмазова Тамара Константиновна**

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

**Guchmazova Tamara Konstantionovna**

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



УДК 551.574.41(09)

## КРЫМСКИЙ УЧЕНЫЙ-ЛЕСОВОД Ф. И. ЗИБОЛЬД И ЕГО КОНДЕНСАТОР ВОДЯНЫХ ПАРОВ

© 2019 *А.Ф. Зибольд*

---

Исторический обзор работы феодосийского ученого-лесовода Ф. И. Зибольда по постройке на горе Тепе-Оба опытного конденсатора водяных паров. Используются редкие архивные данные и материалы рукописей, хранящихся в фондах Феодосийского музея древностей.

**Ключевые слова:** Крым, Феодосия, конденсатор Зибольда.

---

Наиболее плодотворный период деятельности моего деда, Федора Ивановича Зибольда (1850-1920) (на портрете рис. 1), связан с Крымом, с Феодосией.

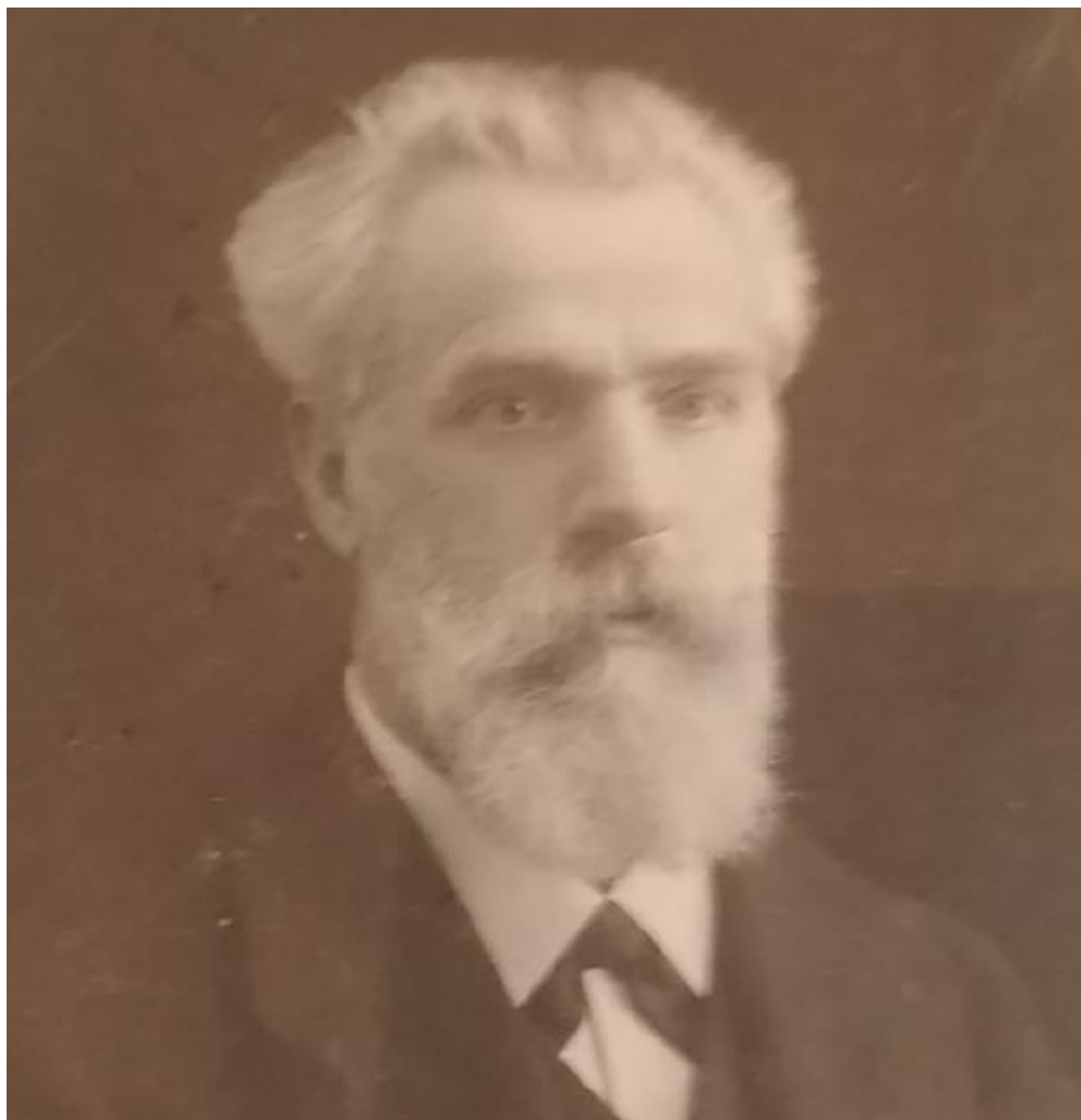
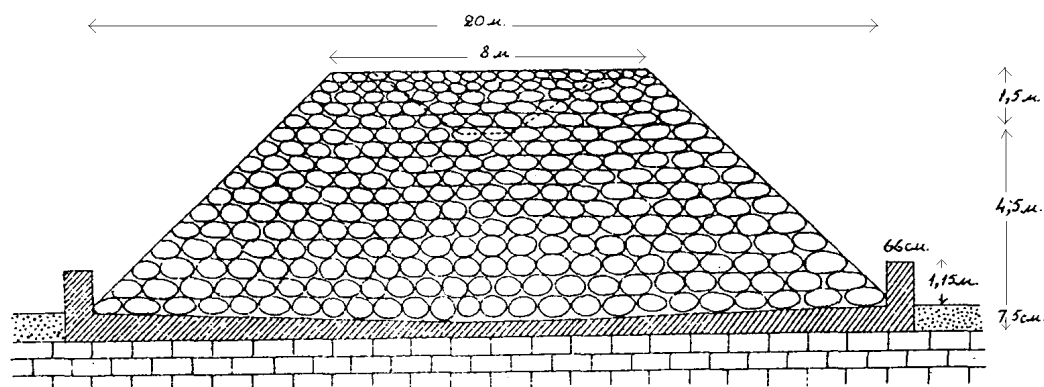


Рис. 1. Федор Иванович Зибольд

Дед имел два высших образования. В 1873 году по окончании университетского курса был удостоен звания действительного студента Императорского С.-Петербургского университета по разряду юридических наук. В 189 году в достаточно зрелом возрасте он окончил Лесной институт в Санкт-Петербурге и был определен помощником лесничего Феодосийского опытного горнокультурного лесничества. В декабре 1895 года представил Совету Лесного института письменное рассуждение "Лесные культуры на Феодосийских горах", которое Советом института было одобрено, а он удостоен звания ученого-лесовода первого разряда со всеми правами и преимуществами кандидатов Российских университетов. В январе 1905 года Ф. И. Зибольду поручается заведование Феодосийским опытным лесничеством. В Феодосии дедом был заложен первый опыт горного лесокультурного мелиоративного лесничества. При облесении гор была использована идея террасирования. Опыт отмечен в научной литературе и учебниках по лесным культурам. Успех лесоразведения в Феодосийском лесничестве был столь значительным, что было рекомендовано использовать Феодосийское опытное лесничество в качестве школы для практического изучения приемов лесной культуры на горах, командируя с этой целью в это лесничество во время лесокультурных работ лесных чинов из лесничеств горного Крыма. В 1908 году деду поручают руководство облесением склонов Крымских гор и назначают ревизором лесоустройства с оставлением в должности заведующего Феодосийским лесничеством, а в 1911 году в дополнение к этому поручается исполнение обязанностей лесного ревизора всей Таврической губернии.

Особая сторона деятельности Ф. И. Зибольда связана с постройкой на высшем пункте лесничества опытного конденсатора для получения воды путем конденсации водяных паров, содержащихся в воздухе (рис. 2). Конденсация происходила за счет различия дневной и ночной температур в достаточно высоком слое береговой гальки определенных размеров, уложенной в виде усеченного конуса в специально сооруженную бетонную чашу с водоотводом.



#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

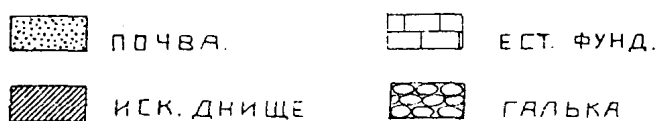


Рис. 2. Схема конденсатора Ф. И. Зибольда



Схема конденсатора взята из статьи Н. Н. Жукова [1]. Он был очевидцем событий: в период строительства конденсатора работал преподавателем природоведения и географии Феодосийской мужской гимназии. К идее такого конденсатора Ф. И. Зибольда привело открытие им на склонах горы Тепе-Оба в окрестностях Феодосии древних (предположительно, генуэзских) гидротехнических сооружений, по его мнению, работавших по тому же принципу и предназначавшихся для снабжения города питьевой водой [2]. Ему удалось привлечь внимание общественности и научных кругов к этой проблеме (Ф. И. Зибольд выступал с публичными лекциями в Феодосии [3,4], на заседаниях метеорологической Комиссии Императорского Русского Географического Общества и Гидрологического Комитета, был приглашен на Второй метеорологический съезд при Императорской Академии наук, где выступил с содокладом [5] и принял участие в дискуссии). Ему удалось получить необходимые ассигнования и построить в 1905-1913 г.г. на высшем пункте вверенного ему лесничества опытный конденсатор (бетонное днище конденсатора и сейчас можно увидеть на горе Тепе-Оба в Феодосии), который некоторое время давал 36 ведер (свыше 400 л) воды в сутки.

Опыт Ф. И. Зибольда находился в центре внимания научной общественности. Об этом может свидетельствовать такой любопытный факт: конденсатор еще находился в стадии строительства, а упоминание о нем с фотографией незавершенного конденсатора (рис. 3) уже появилось в достаточно популярном в начале XX века учебнике по физической географии (1-е изд. 1910 г.) П. И. Броунова, известного российского метеоролога, одного из основоположников агрометеорологии, чл.-корр. Петербургской АН [6].

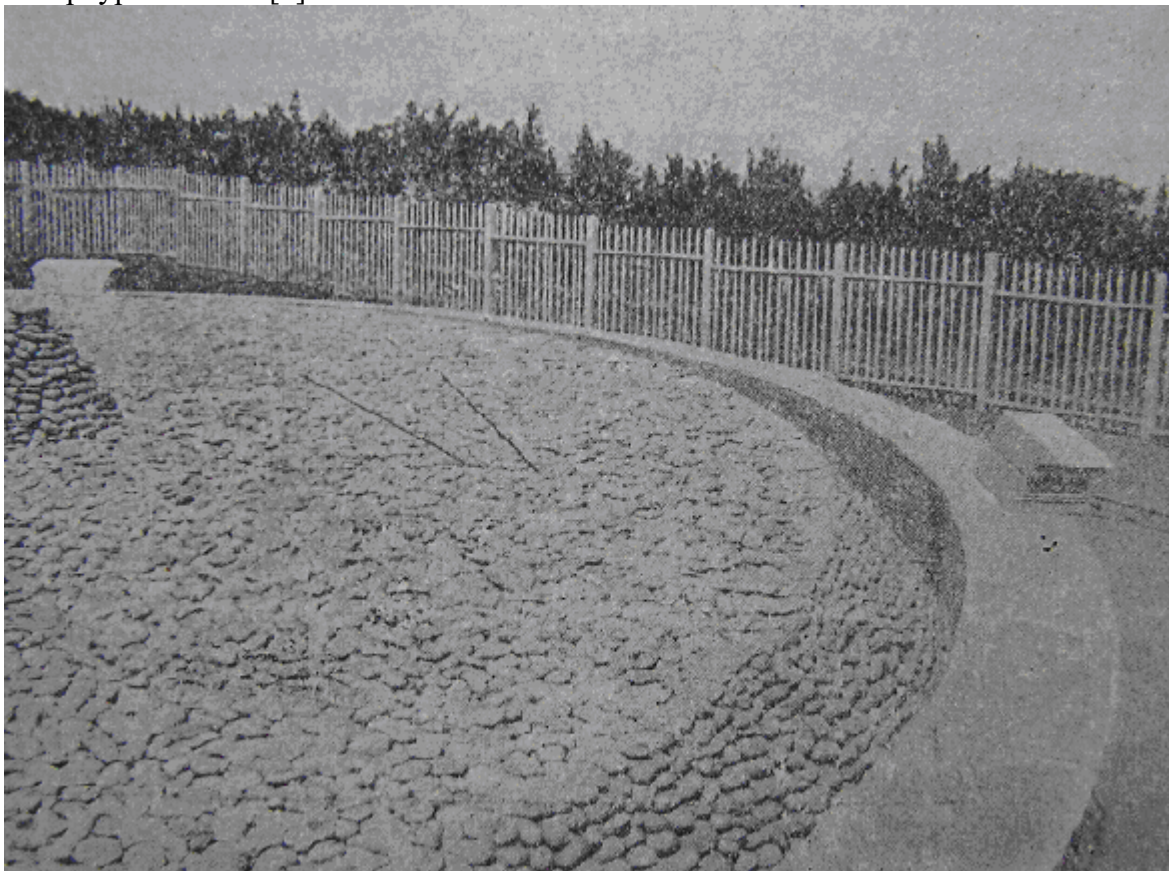


Рис. 3. Строительство конденсатора Ф. И. Зибольда

Во втором издании учебника (1917 г.) П. И. Броунов пишет уже о завершении строительства конденсатора и о постигшей сооружение Ф. И. Зибольда неудаче. Днище конденсатора оказалось недостаточно прочным, через образовавшуюся трещину часть воды стала теряться. Интересную версию выдвинул академик АН Крыма В. Н. Дублянский. По его мнению, конденсация воды происходила не только внутри конденсатора, но и под его днищем. Образующаяся вода размывала непрочный известняк под конденсатором, что и привело в дальнейшем к появлению трещины в днище. В 1915 году конденсатор был разгружен от гальки с целью ремонта днища, но ввиду военного времени необходимые средства получены не были и опыт так и остался незавершенным. Тем не менее, по мнению ученых, это был первый в мире удачный опыт такого рода по получению конденсационной воды. Этот опыт имел большой резонанс в научном мире. О работах Зибольда писали в "Метеорологическом вестнике", дебатировался этот вопрос в "Известиях Русского географического общества" и т. д.

После смерти Ф. И. Зибольда неоднократно возрождался интерес к его работам и по лесоразведению, и по конденсации. В частности было проведено несколько Всесоюзных конференций по конденсации водяных паров воздуха ("воздушный колодец") [7], которые, в основном, были посвящены работам Ф. И. Зибольда. Конденсаторы строили и во Франции, и в США, причем все ссылались на Ф. И. Зибольда. На киностудии "Киевнаучфильм" был снят фильм "Точка росы" (реж. С. Лосев), в котором речь идет о работах Ф. И. Зибольда. В 90-х годах прошлого века в Феодосии трижды побывала французская комплексная научная экспедиция под руководством известного физика Даниэля Бейсанса, изучавшая работы Зибольда по конденсации [8].

Летом 2000 года по инициативе Дворянского собрания Крыма в Симферополе была проведена конференция, посвященная 150-летию со дня рождения Ф. И. Зибольда.



Рис. 4. Логотип «Движение Зибольда»

В 2020-м году исполняется 170 лет со дня рождения и 100 лет со дня смерти Ф. И. Зибольда. Осенью 2019-го года в Феодосии по инициативе А. Л. Соколовой (г. Санкт-Петербург) и самих феодосийцев возникло общественное "Движение Зибольда". Феодосийские художники Борис Николин и Сергей Клеткин нарисовали логотип движения. Инициативная группа выступила с предложением о проведении в 2020-м году Года Зибольда в Феодосии, в рамках которого планируются проведение конференции, круглых столов, художественные выставки в рамках фестиваля "Движение Зибольда" (рис. 4) на тему экологии, создание экскурсионного маршрута "По следам Зибольда", зибольдовские чтения в библиотеках, восполнение волонтерами террасных посадок сосны на склонах Тепе-Оба и Лысой горы, установка памятных досок на доме, где жил Ф. И. Зибольд и городском кладбище, где был похоронен Ф. И. Зибольд, издание книги, посвященной жизни и деятельности феодосийского ученого-лесоведа Федора Ивановича Зибольда.

Работа в архивах позволила обнаружить интересные факты, касающиеся сооружения на горе Тепе-Оба в Феодосии опытного конденсатора водяных паров. Итак, Крым, Феодосия, начало XX века ...

Из отчета Феодосийского горнокультурного лесничества за 1904 год

... Заведующий лесничеством Ф. И. Зибольд подробно обследовал находящиеся в пределах лесничества древние гидротехнические сооружения. По его исследованиям оказалось, что эти сооружения, из которых некоторые действуют, по всей вероятности, и ныне, служили конденсаторами водяных паров атмосферного воздуха и имели назначение снабжать некогда очень многолюдную Феодосию питьевой водой. О своих исследованиях г. Зибольд сделал сообщение 3-му Съезду деятелей по сельскохозяйственному опытному делу под заглавием "Роль подземной росы в водоснабжении города Феодосии" ...

Из плана работы Феодосийского горнокультурного лесничества на 1905 год

...Постановка в небольших размерах опыта воспроизведения древнефеодосийского способа добывания питьевой воды посредством щебневых куч – конденсаторов водяных паров атмосферного воздуха. Такой опыт, в случае успеха, может иметь двоякое значение: во-первых, искусственный источник, устроенный по названному способу, может обеспечить потребность в воде Феодосийского лесничества (в настоящее время для нужд питомника и для служащих и рабочих лесничества вода доставляется в бочках из города, что обходится очень дорого); во-вторых, в случае удачи, подобный опыт может иметь общее значение для многих местностей, находящихся в одинаковых с Феодосией условиях безводия.

Из отчета Постоянной Комиссии по лесному опытному делу за 1906 год

...Кроме лесных культур в Феодосийском лесничестве необходимо отметить производимые заведующим лесничеством Ф. И. Зибольдом исследования над образованием "подземной росы" и предпринятый им грандиозный опыт устройства в самой высшей точке лесничества конденсатора из крупного щебня объемом около 115 куб. саж. для экспериментального изучения данного вопроса. Работы г. Зибольда в данной области заинтересовали все местное общество и для постановки опытов в его распоряжение город Феодосия, местное земство и управление порта отпустили некоторые суммы, на которые и сооружается вышеназванный конденсатор.

При таких условиях, естественно, что и лесное управление должно было оказать некоторое содействие предпринятой работе; это содействие выразилось в приобретении на счет лесного ведомства тех приборов, которые должны быть поставлены в конденсаторе для наблюдений за температурой, образованием и просачиванием воды.

Прошлым летом было устроено основание конденсатора и, вероятно, к будущему лету он будет совершенно окончен.

Благодаря строго обдуманной и настойчивой деятельности Ф. И. Зибольда в Феодосийском лесничестве достигнуты значительные результаты ...

Из рукописи Ф. И. Зибольда "Опыт произведения древнефеодосийского способа  
добывания питьевой воды"

г. Феодосия, 4 декабря 1907 г.

Во время нивелировки феодосийских горных склонов, произведенной мною летом 1900 г. с целью заложения целой системы водосборно-оросительных каналов, долженствовавших обеспечить успех лесоразведения на склонах, мне посчастливилось открыть остатки древних гидротехнических сооружений, служивших, по-видимому, для снабжения некогда многолюдной Феодосии питьевой водой.

Сооружения эти весьма простой конструкции, это ни что иное, как громадные, объемом до 300 куб. саж. конусовидные кучи щебня, сложенные в разных местах по склонам гор на естественных выходах скал, на значительной высоте над уровнем моря. Функционировали эти кучи, насколько мне удалось выяснить, следующим образом:

Представляя очень рыхлую искусственную почву, щебневые кучи весьма легко проницаемы для атмосферного воздуха. Под влиянием постоянно меняющихся барических и температурных условий происходил постоянный обмен между наружным воздухом и воздухом, находящимся в щебневой куче. Наружный атмосферный воздух с находящимися в нем водяными парами, вступая в щебневые кучи и циркулируя в них, на некоторой глубине охлаждался, достигая точки росы, и часть своих водяных паров отдавал в капельно-жидком виде. Таким образом, в щебневых кучах происходила конденсация водяных паров атмосферного воздуха. Такое объяснение функций куч вполне согласуется с теорией образования подземной росы, впервые обоснованной в семидесятых годах прошлого столетия немецким геологом Отто Фольгером. Путем окопки траншеями некоторых куч с нижней их стороны мне удалось констатировать, что собиравшаяся на водонепроницаемой подошве куч вода отводилась посредством гончарных трубопроводов и щебных каналов вниз по склонам в городские фонтаны, из которых жители Феодосии и пользовались уже непосредственно питьевой водой. Внимание, оказанное моим исследованиям местным обществом и некоторыми учреждениями, прямо заинтересованными в практическом разрешении вопроса о добывании в безводных местностях питьевой воды, побудило меня поставить во вверенном мне лесничестве опыт воспроизведения древнефеодосийского способа добывания питьевой воды путем конденсирования водяных паров атмосферного воздуха. Город Феодосия, Феодосийское и Таврическое Земства, Лесной Департамент и Отдел Земельных Улучшений Главного Управления Землеустройства и Земледелия и Комитет по портовым делам Министерства Торговли и Промышленности оказали мне содействие назначением субсидий как на постройку конденсатора, так и на предварительные лабораторные исследования и на точный, научно обставленный учет температурных условий образования подземной росы и количества ожидаемой воды. Конденсатор строится на высшем пункте лесничества, на перевале через гору Тепе-Оба, на высоте 135 саж. над уровнем моря, в области наиболее частых и густых туманов. В окончанном виде он будет иметь форму усеченного конуса с нижним диаметром в 20 метров, верхним диаметром 8 метров, высотой 6 метров и объемом в 115 куб. саж., сложен будет из морской береговой гальки, оказавшейся по моим лабораторным исследованиям материалом наиболее пригодным для конденсирования водяных паров. До настоящего времени произведены следующие работы: устроено каменное, сложенное на гидравлической извести основание в виде круглого бассейна, диаметром в 20 м, с приподнятыми в виде каменной стенки краями и с уклоном от

периферии к центру в 25 сантиметров на 10 метр. Весь бассейн, в видах непроницаемости для воды, покрыт слоем бетона толщиной в 15 см. От центра к периферии устроен выводной желоб, оканчивающийся чугунною 6" трубою, проложенною через стенку бассейна. Для устройства конденсирующего конуса заготовлено и доставлено на место 43 куб. саж. морской береговой гальки, из них уже погружено в бассейн 39 куб. саж. Для учета температурных условий образования подземной росы и количества воды приобретены и частью установлены измерительные приборы: 12 лизиметров и 12 глубоких почвенных термометров. Весь конденсатор обнесен деревянной штакетной оградой...

#### Из отчета Феодосийского опытного лесничества за 1912 год

...Постройка на высшем пункте лесничества конденсатора доведена почти до конца. К сожалению, чрезвычайно холодная и бурная весна и весьма дождливое начало лета мало способствовали своевременному сбору и подвозке гальки, а наступившие очень рано морозы заставили прекратить работы еще задолго до обычного конца строительного периода. Всего за истекший строительный период собрано и подвезено 22,5 куб. саж. гальки, которые и погружены почти полностью в конденсатор вместе с галькой, подвезенной еще осенью прошлого года.

Сверх сего произведены следующие работы: изготовлен ажурный из деревянных брусков вершинный настил на конденсатор, поставлены последние серии лизиметров и эбонитовых трубок для термометров, построена вчерне водомерная будка и приступлено к устройству всхода на конденсатор. Для окончания сооружения необходимо собрать, подвезти и погрузить еще до 2 куб. саж. гальки, окончить постройку водомерной будки и всхода на конденсатор, проложить от конденсатора к водомеру водопроводные трубки и устроить небольшой цементированный водоем для пользования водою.

#### Из отчета Феодосийского опытного лесничества за 1913 год

...Сооружение конденсатора водяных паров атмосферного воздуха и постройка при нем будки с установкой водомера и с прокладкой водопроводных труб закончены в октябре, и с этого времени начались систематические наблюдения над температурными условиями конденсации и над количеством получаемой воды.

#### Из плана работы Феодосийского опытного лесничества на 1914 год

...На законченном постройкою конденсаторе водяных паров атмосферного воздуха предполагается продолжать исследование температурных условий конденсации и наблюдения над количеством получаемой воды. К концу будущего года я надеюсь окончательно выяснить успех или неуспех предпринятого опыта конденсации.

Лесничий Феодосийского опытного лесничества Ф. И. Зибольд

#### Из отчета Постоянной Комиссии по лесному опытному делу за 1914 год

...Как известно, работы в области метеорологии в Феодосийском лесничестве не ограничивались срочными наблюдениями на главной станции и на дополнительных

пунктах и разработкой этих наблюдений. По мысли Ф. И. Зибольда, ставился опыт для выяснения вопроса о том, возможно ли вызвать искусственным образом конденсацию водяного пара из воздуха в таком количестве, чтобы полученная вода могла быть использована для практических целей. В 1908 г. было уже закончено сооружение бетонного бассейна конденсатора, была уложена в нем галька до высоты около метра или даже больше, были установлены почвенные термометры на дне бассейна; оставалось еще добавить гальки, чтобы получилась коническая куча, выдающаяся над бассейном, и установить водомер. В своем отчете за 1908 г. я указал на необходимость некоторых дополнительных наблюдений; замечания к постановке опыта были мною представлены в свое время и Гидрологическому Комитету, почему здесь повторять их не буду.

В отчетном году сооружение конденсатора было вполне закончено, однако к крайнему огорчению не только самого исследователя, но и всех интересующихся опытом, выяснилось, что никаких результатов получить нельзя, так как дно бассейна конденсатора не выдержало нагрузки и в нем образовалась трещина, в которую уходит часть скопляющейся воды. Из-за прискорбной ошибки в техническом проекте сооружения, затраченные труд и средства оказались бесплодными и не подвинули вперед разрешения поставленной задачи. Однако справедливость требует сказать, что за Ф. И. Зибольдом остается большая заслуга в том, что он выдвинул чрезвычайно важный вопрос о конденсации водяного пара из воздуха, и постановкой своего опыта привлек к этому вопросу внимание физиков, гидротехников и гидрологов, благодаря чему у нас в России в настоящее время делаются попытки подойти к решению вопроса разными путями, при том отчасти в более благоприятных условиях; в русской специальной литературе появились уже исследования, посвященные этому вопросу, и есть основания думать, что инициатива Ф. И. Зибольда окажется плодотворной.

Не рассчитывая довести до конца опыт с конденсатором, ввиду большой стоимости переустройства его, Ф. И. Зибольд устроил на свои средства для той же цели больших размеров лизиметр. Не входя в оценку применения лизиметрических наблюдений для этой цели, нельзя не признать значительного интереса за ними, и поэтому можно лишь приветствовать это новое начинание ...

#### Феодосийское лесничество

#### Отчет за 1915 год и предположения о работах в 1916 году

...Осенью отчетного года, согласно заключению Особой комиссии из представителей Отдела земельных улучшений, Лесного департамента и земства была произведена разгрузка конденсатора, после чего вновь собравшиеся члены комиссии удостоверились в наличии трещин в дне конденсатора, через которые налитая на дно вода целиком уходила в эти трещины. По постановлению комиссии, в случае предоставления Отделом земельных улучшений денежных средств, предположено соорудить новое дно из железобетона с последующей нагрузкой вынутой гальки.



## Ж У Р Н А Л

заседания совещания по осмотру конденсатора, сооруженного  
в Феодосийском лесничестве

19 июня 1915 года по приглашению Отдела Земельных Улучшений под председательством Начальника Управления Земледелия Таврической и Екатеринославской губерний Д.С.С. Н. М. Ярцева, при участии Начальника Крымских водных изысканий инженера К. Д. Кельцера, лесничего Феодосийского опытного Горнокультурного лесничества Ф. И. Зибольда, Председателя Таврической Губернской Земской Управы Я. Т. Харченко и временно исполняющего обязанности Помощника Управляющего Отдела Земельных Улучшений Д. С. Флексора, Члена Государственной Думы С. С. Крыма и Производителя работ Феодосийского порта инженера М. Н. Сарандинаки, произвели осмотр сооружения для опыта конденсации подземной росы, построенного в Феодосийском лесничестве. В присутствии означенных лиц было сделано обследование dna конденсатора, для этой цели было влито в бассейн 1200 литров воды равномерно по всей окружности в течение 1 часа. Вода была продержана 1,5 часа и по открытии выпускного крана получено 40 литров. Это обстоятельство подтвердило, по мнению присутствующих, предположение об образовании трещин, унесших воду со dna конденсатора. Поверочная доливка воды по 10 литров в двух секторах окружности вполне убедила в полной справедливости предположений г. Зибольда, который, произведя выливание чашки конденсатора без задержки воды в бассейн, получил 50% влитой воды из выпускного крана, между тем в предшествующие годы потеря при выливании не превышала 8%, что объясняется расходом воды на смачивание бетонного dna бассейна. Принимая во внимание, что без разгрузки конденсатора нет возможности определить ни размера, ни характера, ни происхождения трещин, а равно признавая, что это обстоятельство мешает окончанию поставленного опыта по вопросу чрезвычайной важности конденсации подземной росы, и несколько не подрывает самой идеи постановки и продолжения опыта, Совещание пришло к заключениям: 1) разгрузив бассейн от гальки, обнажить дно его, 2) по выяснении причин происшедших деформаций на дне конденсатора, разрешить вопрос о возможности ремонта его или сооружения нового бассейна, 3) стоимость намеченной в п. 1 работы определить в 1500 рублей, применяясь к местным ценам; об отпуске таковой суммы возбудить ходатайство перед Отделом Земельных Улучшений, 4) до выполнения намеченных работ оставить открытым вопрос о размере расхода по ремонту существующего бассейна, или, в случае надобности, о стоимости сооружения нового основания для конденсатора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков Н. Н. О древних гидротехнических сооружениях в ближайших окрестностях г. Феодосии в связи с вопросом об изучении принципов добычи влаги из атмосферы / Н. Н. Жуков // Феодосийское отделение общества по изучению Крыма и археологический музей. Сборник статей по экономике, быту и истории Феодосийского района. Выпуск 1-й. – Феодосия, 1931.
2. Зибольд Ф. И. Роль подземной росы в водоснабжении г. Феодосии / Ф. И. Зибольд // Почвоведение. – 1904. – № 4. – С. 323-343.
3. Зибольд Ф. И. Подземная роса и новая теория происхождения грунтовых и ключевых вод / Ф. И. Зибольд. – Феодосия, 1906. (Рукопись, хранящаяся в Феодосийском музее древностей).
4. Зибольд Ф. И. Опыт произведения древнефеодосийского способа добывания питьевой воды / Ф. И. Зибольд. – Феодосия, 1907. (Рукопись, хранящаяся в Феодосийском музее древностей).

5. Зибольд Ф. И. Дополнение к докладу № 8 С. Н. Никитина / Ф. И. Зильборд // Протоколы II Метеорологического съезда. – Санкт-Петербург, 1909. – С. 290-294. (Никитин С. Н. Современное положение вопроса об образовании почвенной росы в связи с питанием растительности в пустынно-степных областях и образованием грунтовых вод: Доклад С. Н. Никитина, представленный Гидрологическим комитетом // Приложения к Протоколам Второго метеорологического съезда при Имп. академии наук. – Санкт-Петербург: Издательство Императорской академии наук, 1910. – С. 277-290.)
6. Броунов П. И. Курс физической географии: Общие сведения о земле, морфология суши, воды суши, океаны и моря: руководство для студентов и учеников старших классов средних учебных заведений / П. И. Броунов. – Санкт-Петербург: Издание К.Л. Риккера, 1910. – 540 с.
7. Данилевский В. В. К вопросу о конденсации атмосферной влаги на основании археологических данных / В. В. Данилевский // Стенограмма I конференции по конденсации водяных паров воздуха. – Москва; Ленинград, 1935. – С. 67-77.
8. Les fontaines aeriennes de Theodosia // Rapport de la deuxième mission franco-ukrainienne effectuée à Féodosia (Crimée, Ukraine). Août 1994.

*Поступила в редакцию 25.09.2019 г.*

#### CRIMEAN FOREST SCIENTIST F.I. ZIBOLD AND HIS WATER STEAMS CONDENSER

##### *A.F. Zibold*

The historical review is presented of the work by forest scientist from Feodosia, F. I. Zibold who built an experimental water condenser on the mountain Tepe-Oba. Rare time-of-construction records and excerpts from the manuscripts stored in the archives of the Feodosia Museum of Antiquities are used.

**Keywords:** Crimea, Feodosia, Zibold's condenser.

**Зибольд Александр Федорович**  
пенсионер,  
ДНР, г. Донецк.  
E-mail: aleksandrzibold@gmail.com

**Zibold Alexander Fedorovich**  
pensioner,  
DPR, Donetsk.



**110-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ВЫДАЮЩЕГОСЯ УЧЁНОГО,  
ЧЛЕНА-КОРРЕСПОНДЕНТА АН УССР, ПРОФЕССОРА, ДОКТОРА  
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ЗАСЛУЖЕННОГО ДЕЯТЕЛЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ  
ИВАНА ЛУКИЧА ПОВХА**



Иван Лукич Повх

И. Л. Повх родился 11 ноября 1909 года в п. Мирополье Курской губернии (ныне Сумская область Украины) в семье рабочего. Его детство прошло в Донбассе (г. Юзовка), где он учился в школе, с 14 лет работал учеником слесаря и слесарем на металлургическом заводе, а затем в шахте. В 1924 году Иван Лукич поступил в комсомол, а в 1929 году стал членом ВКП(б).

Высшее образование И. Л. Повх получил в Ленинграде (Военно-инженерная школа в 1928–30 гг., курсы подготовки в аспирантуру по математике при Государственном Институте научной педагогики в 1931–33 гг., физико-механический факультет Ленинградского политехнического института в 1934–38 гг.).

В период сталинских репрессий с 1938 по 1940 год, находясь в ссылке, работал учителем средней школы, доцентом и заведующим кафедрой математики Учительского института в г. Тобольске.

После реабилитации и восстановления в партии Иван Лукич Повх вернулся в Ленинградский политехнический институт, в котором после окончания аспирантуры плодотворно занимался научной и педагогической деятельностью.

В годы Великой Отечественной войны Иван Лукич воевал и трудился в Ленинграде. С первых дней блокады он политбоец 11-ой бригады, воевал на Финском, Калининградском участках фронта, на знаменитой Невской Дубровке. В одном из боев Иван Лукич был тяжело ранен. За ратные подвиги в дни блокады Ленинграда награжден орденом Красной Звезды, медалями.

После лечения в госпитале, оставаясь доцентом и исполняющим обязанности декана физико-математического факультета ЛПИ, Иван Лукич был назначен начальником лаборатории по испытанию фильтров-поглотителей отравляющих веществ (хлор, хлорпикрин, фосген, синильная кислота и т. д.) для газозащиты города.

В лаборатории аэродинамики, которую Иван Лукич возглавлял на протяжении всей войны, был налажен ремонт ингаляторов для Ленинградского фронта, создавались новые

способы увеличения высоты подъема аэростатов заграждения от фашистских самолетов. Здесь же, в лаборатории, по предложению профессора П.П. Кабека, перерабатывали техническую олифу в пищевые продукты и разрабатывали способы повышения эффективности производства пищевых дрожжей из отвалов древесных опилок. Большая часть Украины была еще оккупирована, а лаборатория во главе с Иваном Лукичом получила задание приступить к исследованию гидродинамических характеристик турбин Днепровской ГЭС.

Кандидатскую диссертацию И. Л. Повх защитил в сентябре 1943 года и продолжал трудиться в Ленинградском политехническом институте. Одновременно Иван Лукич проводил исследования и в других лабораториях Ленинграда, а также работал по совместительству главным библиотекарем отдела систематизации технической литературы Публичной библиотеки им. Салтыкова-Щедрина. В 1952 году И. Л. Повх успешно закончил цикл работ по основным аэродинамическим свойствам решеток профилей, а в 1953 г. по этой же проблеме защитил докторскую диссертацию. В 1954 году Иван Лукич получил звание профессора кафедры гидроаэродинамики.

В последующие годы, будучи профессором ЛПИ, И. Л. Повх проводит большую научно-исследовательскую работу для нужд промышленности. В этот период научные интересы Ивана Лукича сосредоточены на исследовании гидравлических и паровых турбин. В 1955 г. выходит монография И. Л. Повха "Моделирование гидравлических турбин на воздухе", которая сыграла большую роль в становлении турбиностроения в СССР. Большое внимание Иван Лукич уделяет также методам измерений аэродинамических характеристик потоков, исследованию отдельных элементов аэродинамических установок. Результаты этой работы обобщены в фундаментальных монографиях "Аэродинамический эксперимент в машиностроении", "Техническая гидромеханика", ставшие настольными книгами гидроаэродинамик-экспериментаторов, физиков, металлургов, машиностроителей и т. д. Одна из монографий Ивана Лукича переведена на японский язык, а один из учебников издан в Египте (Александрия) на арабском языке, десятки научных статей опубликованы в США, Германии и т. д. И. Л. Повх на протяжении всей жизни уделял внимание популяризации достижений науки. Широкую известность получили его книги о Н.Е. Жуковском и Л. И. Лутугине.

Начиная с 1958 года, И. Л. Повх работает по совместительству в Институте механики АН УССР (г. Киев), а с 1960 года, по приглашению, переходит на постоянную работу заместителем директора Института горного дела АН УССР и переезжает из Ленинграда в Донецк. В 1961 году И. Л. Повх был избран членом-корреспондентом АН УССР по отделению механики.

В 1962–63 гг. Иван Лукич работал заведующим отделом Донецкого НИИ черных металлов и по совместительству был профессором Донецкого педагогического института.

При активном участии И. Л. Повха на базе педагогического института был создан Донецкий государственный университет, первым профессором которого он по праву и был зачислен в 1965 году.

С началом работы в Донецком научном центре АН УССР, под руководством И.Л. Повха начинает формироваться донецкая школа физической гидродинамики.

В 1964 году И. Л. Повх создает кафедру физической гидродинамики в Донецком государственном университете, которая проводит подготовку специалистов в области физической гидродинамики, а затем (с 1991 г.) и в области физической экологии, крайне необходимых промышленному Донбассу.

За время работы в Донецке И. Л. Повхом развит ряд новых направлений прикладной гидроаэродинамики: магнитогидродинамическая сепарация полезных ископаемых, МГД-транспортировка и дозировка жидких металлов и др. Результаты исследования этих научных направлений обобщены и в монографиях: “Магнитная гидродинамика в металлургии”, “Теория продувки сталеплавильной ванны”, “Магнитогидродинамическая сепарация” и т. д.

С 1967 года под руководством И. Л. Повха и при его непосредственном участии начаты систематические исследования по разработке методов измерения характеристик турбулентных потоков, конечной целью которых является создание автоматизированных измерительных комплексов. В это же время под руководством Ивана Лукича начинает развиваться новое в СССР направление – снижение гидродинамического сопротивления трения микродобавками высокомолекулярных полимеров и мицеллообразующих поверхностно-активных веществ.

Пройдет чуть более десяти лет и в Донецке во главе с И. Л. Повхом будет создана одна из крупнейших и общепризнанных в мире гидродинамических школ. Созданные им в Донецком госуниверситете кафедра физической гидродинамики (с 1991 г. кафедра физики неравновесных процессов и экологии) и специальное конструкторско-технологическое бюро “Турбулентность” успешно функционируют и в настоящее время, реализуя идеи, высказанные их основателем.

Иван Лукич являлся учителем учителей.

Плодотворная научная деятельность Повха постоянно и успешно сочеталась с педагогической, с подготовкой научных кадров высшей квалификации и большой общественной работой. Он являлся членом научных советов АН СССР и АН УССР, ученых советов по защите диссертаций, членом ряда редакционных советов.

Под научным руководством И. Л. Повха подготовлено свыше 80 кандидатов и 17 докторов наук. И. Л. Повх – автор более 300 научных работ, около 100 авторских свидетельств на изобретения, опубликовал 10 монографий, основным содержанием которых является решение проблем механики жидкостей и газа, вопросы истории, науки и техники.

Широко известна деятельность Ивана Лукича по организации научных конференций в Донецком госуниверситете. Многим памятли научные конференции по прикладной магнитной гидродинамике в семидесятые годы. Конференции по турбулентности, проведенные в восьмидесятые-девяностые годы, способствовали не только научному обмену, но и установлению дружественных отношений между известными научными школами Москвы, Ленинграда, Минска, Киева, Новосибирска, Донецка и других городов СНГ.

За плодотворный труд Иван Лукич был награжден медалями, Почетной грамотой Президиума Верховного Совета Украинской ССР, ему было присвоено звание заслуженного деятеля науки и техники Украины.

Благодарные ученики:

Профессора:



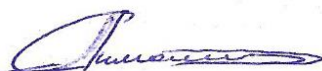
В.В. Белоусов



Н.И. Болонов



Ф.В. Недопекин



А.П. Симоненко

Доценты:



П.В. Асланов



Н.Ф. Финошин

## 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. Аннотацию и ключевые слова рекомендуется отделять с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание, например, постановка задачи, методы ее решения, анализ полученных результатов. В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее 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:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языке):
  - **Фамилия, имя, отчество;**
  - ученая степень и звание, должность, с указанием организации (полное название, в именительном падеже), которую представляет автор;
  - страна, город;
  - адрес электронной почты.

5. Образец оформления статьи:

УДК 004.62

## МЕТОДЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ

© 2019 *И.А. Третьяков, В.В. Данилов*

---

В настоящей работе произведен сравнительный анализ методов параллельной сегментации экспериментальных кривых, выявлены соответствующие недостатки, предложены решения и рекомендации для их устранения.

**Ключевые слова:** экспериментальные кривые; сегментация; квадратичная невязка; разладка; минимизация.

---

**Введение.** При решении задачи сегментации экспериментальных кривых выделяют...

**Постановка задачи.** Методы сегментации экспериментальных кривых имеют...

**Сегментация параллельными методами.** В методах параллельной...

**Выводы.** Рассмотренные в данной работе методы имеют как преимущества, так...

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров И. В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов / И. В. Никифоров. – Москва : Наука, 1983. – 199 с.
2. Медведева Е. В. Метод сегментации изображений в прикладных телевизионных системах / Е. В. Медведева, Е. Е. Курбатова // Т-Comm. – 2010. – № 2. – С. 46-49.

*Поступила в редакцию xx.xx.2019 г.*

### METHODS OF PARALLEL SEGMENTATION EXPERIMENTAL CURVES

*I.A. Tretiakov, V.V. Danilov*

In this paper, comparative analysis of methods of parallel segmentation experimental curves revealed deficiencies and proposed solutions and recommendations for their elimination.

**Keywords:** experimental curves; segmentation; quadratic discrepancy; frustration; minimization.

**Третьяков Игорь Александрович**

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

**Tretiakov Igor Aleksandrovich**

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

**Данилов Владимир Васильевич**

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

**Danilov Vladimir Vasilevich**

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



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 подрисовочную 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 - подрисовочная подпись). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами. Сканированные рисунки не принимаются. Образец оформления рисунка и таблицы:

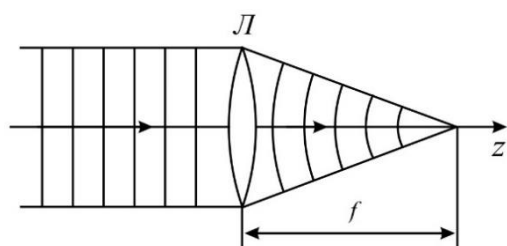


Рис. 4. Действие линзы на плоскую волну

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:

Донецкая Народная Республика 83001, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13, Физико-технический факультет.

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

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

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

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

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



*Научное издание*

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

**2019. – № 3**

Технический редактор: И.А. Третьяков

---

Адрес редакции:

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,  
ДНР 83001, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24  
Тел.: +38 (062) 302 07 81, +38 (062) 302 92 88  
E-mail: [vestnik.donnu.g@donnu.ru](mailto:vestnik.donnu.g@donnu.ru)  
URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

---

Подписано в печать 27.12.2019 г.  
Формат 60×84/8. Бумага офсетная.  
Печать – цифровая. Усл. печ. л. 9,53  
Тираж 100 экз. Заказ. №

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