

ISSN 2663-4228

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ
*Основан
в 1997 году*

Серия Г
**Технические
науки**

4/2018

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*Печатается по решению Ученого совета
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»
Протокол №10 от 27.12.2018 г.*

Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Серия Г: Технические науки

№ 4

Донецк 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Иванов В.И., Белик Т.В.* Классификационный анализ акустооптических устройств управления лазерным пучком 3

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

- Ильяшенко Е.Д., Сорока В.А., Тимченко В.И.* Фотовольтаический эффект в структуре на основе пленок CVD – алмаза 11
- Гмыря В.А., Данилов В.В.* Оптические информационные технологии. Импульсная характеристика 23

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Третьяков И.А.* Методы параллельной сегментации экспериментальных кривых 36
- Бабичева М.В., Савченко Б.С.* Анализ шифров с наличием S-блока дифференциальным методом 42
- Шалаев А.В., Данилов В.В.* Модель акустооптического элемента спектрального уплотнения-разуплотнения потоков данных автоматизированных систем 49

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Карнаух В.В., Пундик М.А.* Особенности гидродинамики в теплообменных аппаратах с насадочным слоем для охлаждения воды 57
- Бирюков А.Б., Гнителиев П.А., Варакута В.В.* Двухконтурная энергогенерирующая станция с изменяемыми параметрами рабочего тела второго контура 66

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

- Симоненко А.П., Асланов П.В., Дмитренко Н.А.* Снижение турбулентного трения в водных растворах смесей гидродинамически-активных полимеров и поверхностно-активных веществ 79
- Симоненко А.П., Артемова И.А.* Перспективы применения эффекта Томса для повышения эффективности работы гидравлических систем гидротранспорта сыпучих материалов, канализации и отведения сточных вод 94

- Правила для авторов 112

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997

Series G: Technical science

No 4

Donetsk 2018

CONTENTS

INSTRUMENT ENGINEERING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Ivanov V., Belik T. Classification analysis of acoustic control devices for control of a laser beam 3

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

Ilyashenko E.D., Soroka V.A., Timhchenko V.I. Photovoltaic effect in the structure based on the films of CVD diamond 11

Gmyrya V., Danilov V. Optical information technology. Impulse characteristic 23

COMPUTER SCIENCE AND COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

Tretiakov I. Methods of parallel segmentation experimental curves 36

Babicheva M., Savchenko B. Cipers with S-block analysis by differential method 42

Shalaev A., Danilov V. Model of acoustic element of spectral composition-declammation of data of automated systems 49

INDUSTRIAL HEAT AND POWER ENGINEERING

Karnauk V., Pundik M. Features of hydrodynamics in heat exchanger with nozzle for water cooling 57

Biryukov A., Gnitiyev P., Varakuta V. Two-circuit energy generating station with variable parameters of the second contour working body 66

ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN SERVICES

Simonenko A.P., Aslanov P.V., Dmitrenko N.A. Reduction of turbulent friction in aqueous solutions of mixtures of hydrodynamic-active polymers and surface-active substances 79

Simonenko A.P., Artemova I.A. Prospects of the application of the Toms effect to improve effectiveness of hydraulic systems of hydro transportation of bulk materials, sewage and disposal of wastewater 94

Instructions for authors 112

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 535.421

КЛАССИФИКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ АКУСТООПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ
УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ

© 2018 *В.И. Иванов, Т.В. Белик*

В данной статье обосновывается введение новых терминов и определений акустооптических устройств, в которых как базовый элемент выделена акустооптическая ячейка. Предложена классификация устройств управления лазерным пучком оптического диапазона.

Ключевые слова: акустооптическая ячейка; модуляция; оптическое излучение; оптическое приборостроение; упругооптический эффект.

Введение. Развитие лазерных технологий для оптоэлектронных систем предполагает наличие соответствующих элементов управления лазерным пучком. Попытки практически реализовать изделия такого функционального назначения предпринимались неоднократно [1-4]. Однако, как показал опыт их внедрения [5], процесс сдерживается отсутствием соответствующих нормативных документов, регламентирующих порядок их разработки и постановки на производство. Это вызвано рядом причин, основные из которых, по мнению автора, отсутствие доступных пониманию радиоинженера терминов и определений, надежно апробированных методик инженерного проектирования, в т. ч. и с помощью ЭВМ, достаточно обоснованного минимума групп технических характеристик оценки эффективности изделий, методик метрологического контроля, технологических приемов изготовления и т.д. Алгоритм расчета акустооптического устройства для ввода данных в оптоэлектронные системы, технология реализации акустооптических устройств и принцип преобразования радиосигналов в их лазерные аналоги при акустооптическом взаимодействии представлены в [6-8].

Лазерное модуляционное устройство. Согласно ГОСТ 24375-80, термин «модуляция» трактуется как процесс изменения одного или нескольких параметров несущей (поднесущей) в соответствии с изменениями параметров передаваемого сигнала или других сигналов, воздействующих на нее. Другой нормативный документ, ГОСТ 15093 - 75, дает трактовку термина «лазерное модуляционное устройство» как устройства управления лазерным излучением, предназначенного для изменения по заданному закону во времени и (или) в пространстве одного или нескольких параметров лазерного излучения или его положения. Параметры лазерного излучения, которые изменяются в процессе его модуляции, предлагается (по аналогии) назвать информационными.

Информационными параметрами когерентного оптического излучения, по-видимому, являются независимые параметры плоской монохроматической волны [9]: амплитуда напряженности поля, частота изменения поля во времени, вид поляризации, направление вращения поляризации, начальная фаза колебаний, направление распространения волны, азимутальный угол направления распространения, угол

направления распространения в вертикальной плоскости. Тогда, очевидно, по типу изменяемого информационного параметра модуляторы когерентного излучения оптического диапазона могут различаться как амплитудные, частотные, фазовые, поляризационные и, не имеющие аналога в радиоэлектронике, направления (дефлекторы). Предложенная автором классификация таких модуляторов оптического (устройств управления лазерным пучком) диапазона приведена на рис. 1.

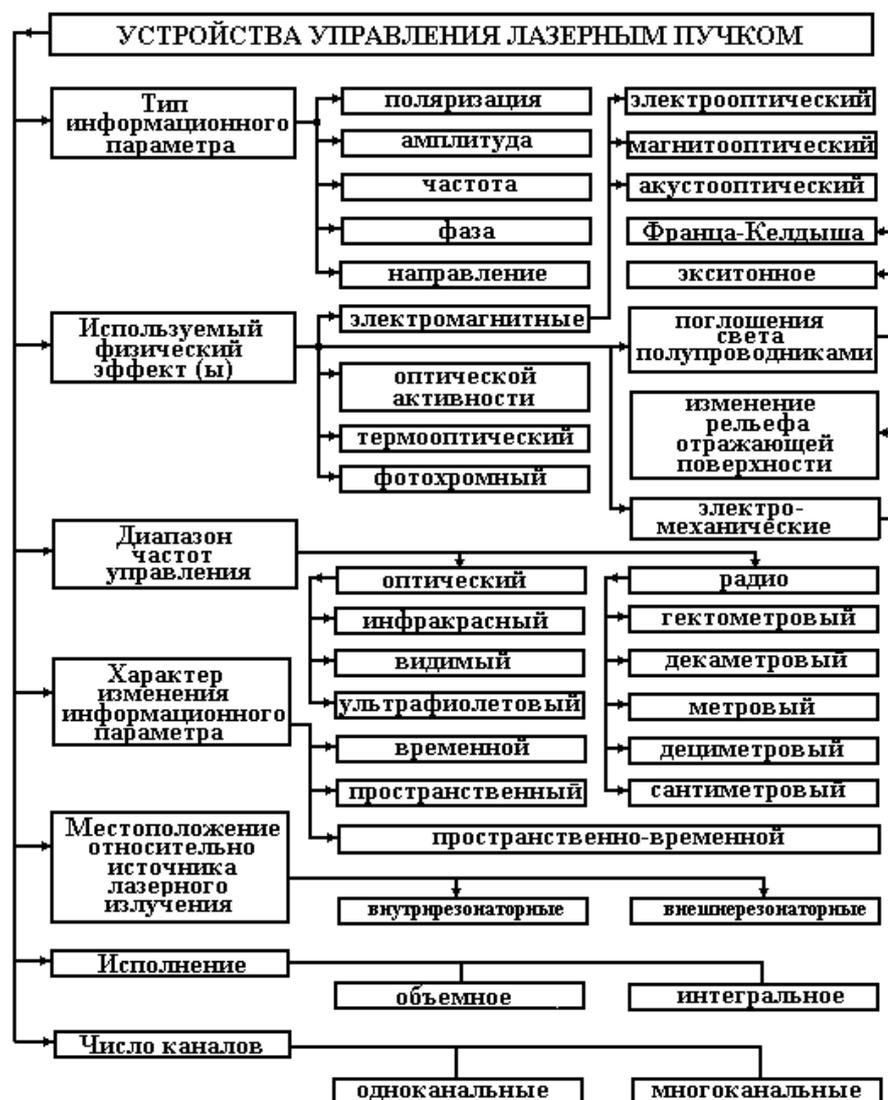


Рис. 1. Классификация устройств управления лазерным излучением (модуляторов лазерного излучения)

Наиболее широкое применение нашли электро-, магнито- и акустооптические модуляторы. В оптоэлектронных системах обработки радио- и оптических сигналов, системах оптической памяти и вычислительной техники в подавляющем большинстве применяются акустооптические устройства (АОУ) управления лазерным пучком.

Физические основы и основы построения приборов акустооптики рассмотрены в [10—14]. В соответствии с ГОСТ 24453-80 акустооптический эффект определен как изменение показателя преломления вещества под действием акустических колебаний. По мнению автора, это определение было бы полнее, если следовать работам [10, 13], где акустооптический эффект определен как изменение показателя преломления сред

под действием упругих волн, обусловленное фотоупругим эффектом.

Единым базовым элементом любого АОУ является акустооптическая ячейка (АОЯ) (рис. 2), в состав которой входят: 1 – электроакустический преобразователь, 2 – внешний электрод ЭАП, размерами $L \times H$ (определяющий длину и высоту акустооптического взаимодействия), 3 – внутренний электрод, 4 – светозвукопровод (СЗП), 5 – недифрагированный лазерный пучок, 6 – дифрагированный лазерный пучок, 7 – акустическая нагрузка, 8 – падающий на СЗП лазерный пучок, D – диаметр падающего лазерного пучка.

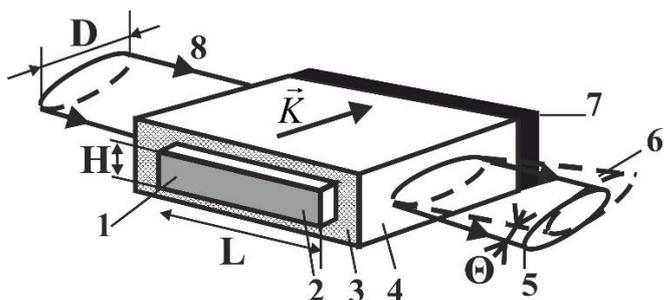


Рис. 2. Структура акустооптической ячейки

Конструктивные элементы АОУ показаны на рис. 3 (здесь элементы АОЯ: ВнешЭ - внешний электрод, ПЭП - пьезоэлектрическая пластина, ВнЭ - внутренний электрод, элемент АС - элемент акустической связи, ПП - просветляющее покрытие, узел ПАЭ - узел поглощения акустической энергии, АП - акустический поглотитель). Модуль обеспечения эксплуатационной стабильности и АОЯ конструктивно объединены.

В акустооптической ячейке выделяются узлы ЭАП, АОВ и ПАЭ. Модуль возбуждения ЭАП может быть как объединенным с АОЯ, так и пространственно разнесенным - в зависимости от конструктивных особенностей прибора. Предлагаемые классификационные признаки АОЯ приведены на рис. 4.

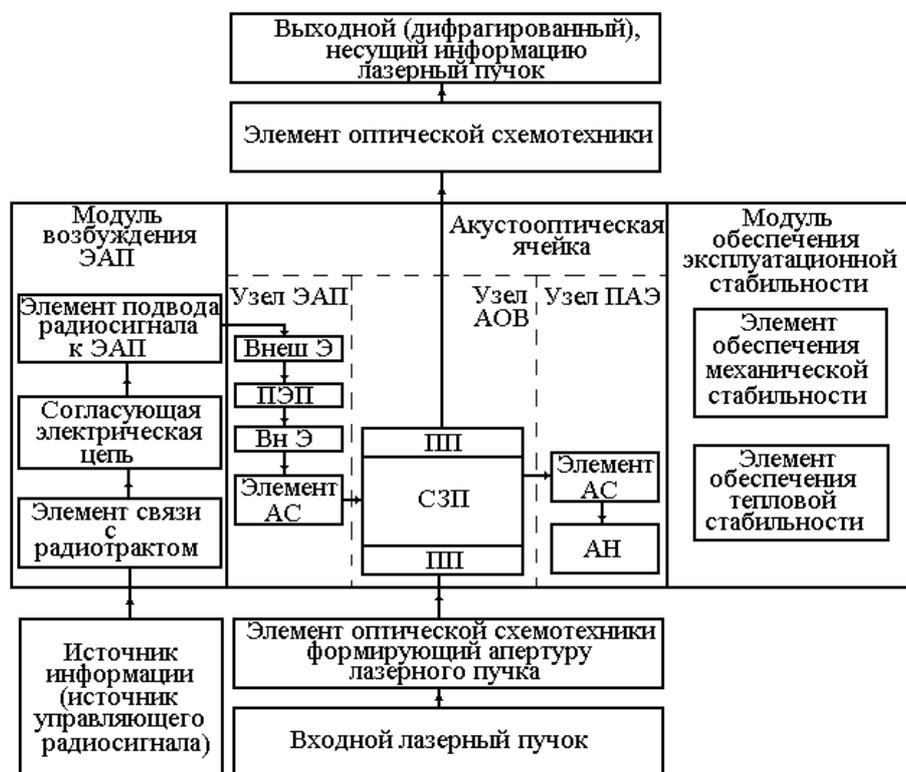


Рис. 3. Конструктивные элементы акустооптического устройства

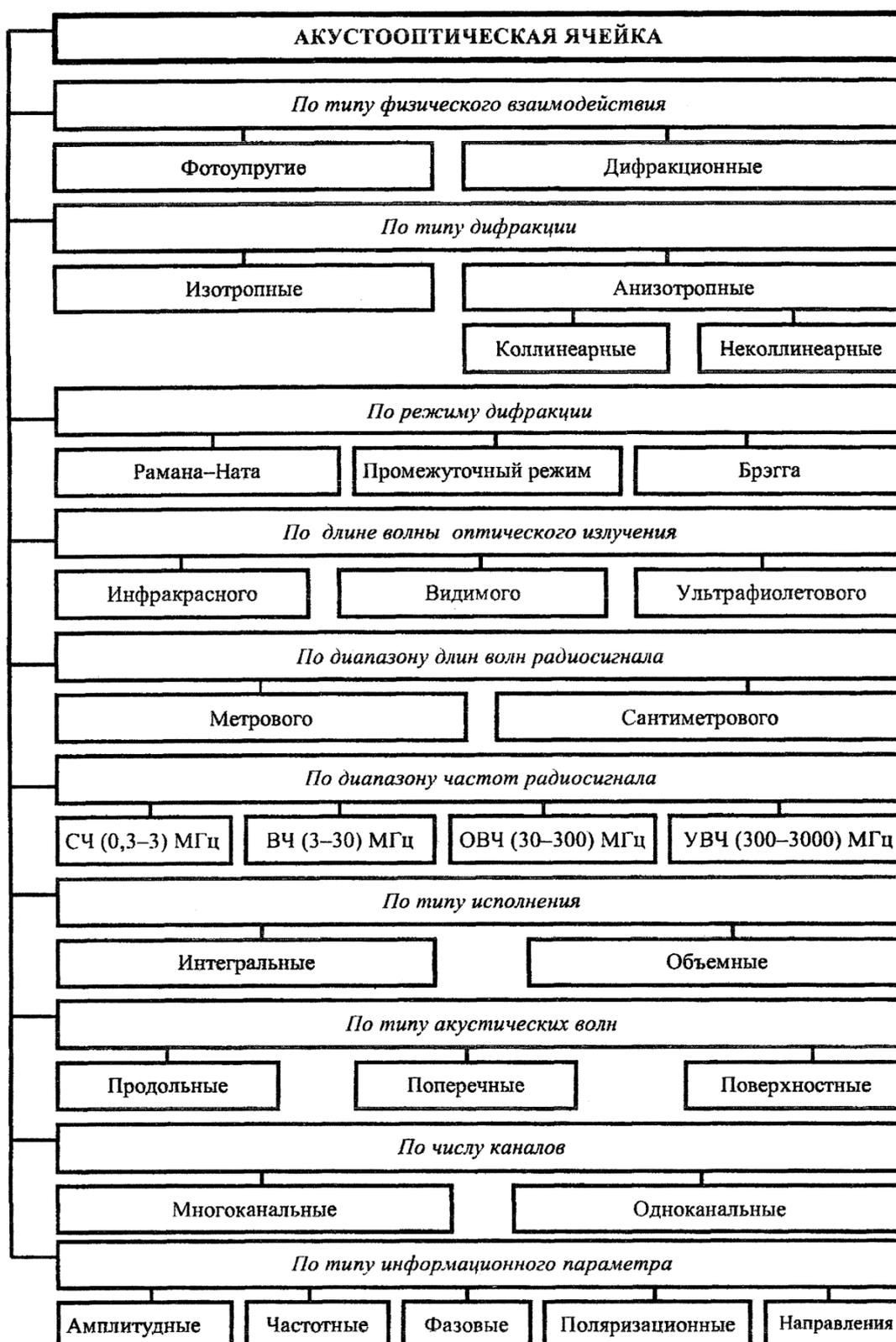


Рис. 4. Классификационные признаки акустооптической ячейки

Основным видом модуляции когерентного излучения, реализуемого с помощью АОЯ, является фазовая модуляция, индекс которой при акустооптическом взаимодействии (АОВ) определяется выражением:

$$a_0 = \pi / (\lambda \cos \theta_B) \sqrt{P_a M_2 L / (2H)},$$

где λ - длина волны лазерного излучения в вакууме, θ_B - угол падения лазерного пучка на узел АОВ, P_a - часть активной мощности акустической волны, возбуждаемой ЭАП, участвующая в АОВ, $M_2 = n^6 p^2 / (\rho V_a^3)$ - акустооптическая добротность среды СЗП, n - показатель преломления СЗП, p - фотоупругая постоянная среды СЗП, ρ - плотность среды СЗП, V_a - скорость акустической (упругой) волны в СЗП, L, H - длина и высота АОВ (см. рис.2)

Упругооптический эффект предполагает реализацию фотоупругих и дифракционных АОЯ. Чаще используются последние, различающиеся режимами дифракции. Для определения режима дифракции используется параметр Кляйна – Кука

$$Q_{KK} = 2\pi\lambda L / (n\Lambda_B^2), \quad (1)$$

где Λ_B - длина акустической волны на частоте, при которой углы падающей и дифрагированной оптических волн относительно нормали к фронту акустической волны равны.

При величине (1) $Q_{KK} < 1$ распределение дифрагированного поля оптической волны на выходе АОЯ описывается отношением амплитуд вида:

$$\dot{E}_1 / \dot{E}_\Pi J_1(a_0), \quad (2)$$

где \dot{E}_1 и \dot{E}_Π - комплексные амплитуды поля световой волны в максимуме первого дифракционного порядка и в падающей на АОЯ оптической волне, соответственно. При этом режим дифракции получил название Рамана-Ната.

При $Q_{KK} > 10$ то же распределение имеет вид:

$$\dot{E}_1 / \dot{E}_\Pi \sin(0,5a_0)^2. \quad (3)$$

Такой режим получил название режима Брэгга. Функция Бесселя первого рода и функция синуса могут быть представлены в виде степенных рядов, при этом общий вид выражения, объединяющего их:

$$R(a_0) = 0,5a_0 - c_3 a_0^3 + c_5 a_0^5 - c_7 a_0^7 \dots \quad (4)$$

Для режима Рамана-Ната $c_3 = 0,0625$, $c_5 = 2,604 \times 10^{-3}$, $c_7 = 1,35 \times 10^{-5}$; для режима Брэгга $c_3 = 0,0208$, $c_5 = 0,25 \times 10^{-3}$, $c_7 = 0,0387 \times 10^{-5}$.

Оценки показывают, что при $a_0 < 0,5$ для любых Q_{KK} отношения амплитуд вида (2) и (3) хорошо аппроксимируются первым членом ряда (4), причем ошибка составляет менее 3%. В этом случае говорят о линейной амплитудной характеристике АОЯ и о линейном характере акустооптического взаимодействия. Тогда при малых индексах фазовой модуляции, независимо от режима дифракции, интенсивность света в первом дифракционном максимуме равна:

$$I_1 = I_{II}(0,5a_0)^2,$$

где I_1 и I_{II} - интенсивность лазерного пучка в первом дифракционном порядке и в падающем на светозвукопровод АОЯ.

Величину относительной интенсивности лазерного пучка в первом дифракционном максимуме, выраженную в процентах на единицу мощности акустической волны (%/мВт), предлагается назвать акустооптической эффективностью. Она описывается выражением:

$$K_a = 100I_1 / (I_{II}P_a) = \pi^2 M_2 L / (2\lambda^2 H \cos^2 \theta_B). \quad (5)$$

Электрооптической эффективностью, т. е. реальной энергетической эффективностью АОЯ (%/мВт), предлагается считать величину, описываемую выражением вида:

$$K_d = 100I_1 / (I_{II}P_0), \quad (6)$$

где P_0 - мощность, отдаваемая в согласующую цепь АОЯ источником управляющего радиосигнала.

Учитывая введенные величины K_a и K_d (5, 6), частотную характеристику электрооптической эффективности (ЭОЧХ) определим как:

$$K_d(\Omega) = K_a \prod_{i=1}^n k_i(\Omega),$$

где $k_1(\Omega)$ - частотная зависимость энергетической эффективности преобразования электромагнитной волны, возбуждаемой источником радиосигнала, в акустическую; $k_2(\Omega)$ - частотная зависимость акустооптической эффективности, обусловленная механизмом акустооптического взаимодействия; $k_3(\Omega)$ - частотная зависимость акустооптической эффективности, обусловленная затуханием акустической волны при распространении в СЗП; $k_4(\Omega)$ - частотная зависимость диссипативных потерь в ЭАП и элементах узла электрического возбуждения ЭАП.

При проектировании АОЯ необходимо учитывать коэффициент передачи света светозвукопроводом, описываемый выражением:

$$K_t = (1 - R^2) \exp(-K_\lambda l),$$

где R, K_λ - коэффициенты отражения и светопоглощения СЗП; l - толщина СЗП для проходящего лазерного пучка.

Применение формирующей (входной и выходной) линзовой оптики и просветляющих покрытий на СЗП при реализации конкретного АОУ на основе АОЯ требует учета световых потерь в них. Следовательно, общий коэффициент передачи света лазерного пучка будет:

$$K_t = K_{t1} K_{t2} \dots K_{tm},$$

где $K_{ti} = (1 - R_i^2) \exp(-K_{\lambda i} l_i)$ - коэффициент передачи света отдельных элементов оптического тракта.

Таким образом, с учетом введенных понятий коэффициент передачи акустооптической ячейки может быть определен как:

$$K_T = K_d K_t.$$

Определив акустооптическую ячейку как базовый элемент акустооптических устройств, необходимо отметить следующее: в оптоэлектронике традиционно используется терминология как радиоэлектроники, так и оптического приборостроения. В связи с этим при однозначном определении функционального назначения устройства управления лазерным пучком необходимо обозначить и целевое назначение системы. Предлагается для устройств управления лазерным пучком, принцип действия которых основан на акустооптическом эффекте, ввести следующие определения:

- акустооптический модулятор, используется как элемент ввода информации в оптоэлектронные системы спектрального и корреляционного анализа радиосигналов, реализующий линейные преобразования энергии управляющего радиосигнала в энергию лазерного пучка, а частота радиосигнала - в угол отклонения пучка;

- акустооптическая линия задержки, используется как и акустооптический модулятор, но реализует задержку энергии импульса лазерного пучка во времени по отношению к управляющему дискретному радиосигналу (радиоимпульсу);

- акустооптический затвор, используется как элемент ввода информации в оптоэлектронные системы записи, хранения и считывания информации, реализующий преобразование энергии управляющего дискретного радиосигнала в энергию лазерного пучка, дискретного во времени и близкого по форме к прямоугольной;

- акустооптический дефлектор, используется как и акустооптический затвор, но реализует непрерывное отклонение лазерного пучка при заданном уровне изменения его энергии на угол, пропорциональный непрерывно изменяющейся частоте управляющего радиосигнала;

- акустооптический сканер, реализует дискретное отклонение лазерного пучка при заданном уровне отклонения его энергии в результате преобразования дискретно изменяющейся частоты радиосигнала.

Необходимо отметить, что на основе АОЯ, используя анизотропную дифракцию света на акустических волнах, можно реализовать так называемый акустооптический фильтр, предназначенный для селекции оптических сигналов при поступлении на вход управления соответствующих радиосигналов.

Выводы. Основным базовым элементом акустооптических устройств управления лазерным пучком является акустооптическая ячейка, которой присущи все свойства, трактуемые термином «лазерное модуляционное устройство».

Конкретное название акустооптической ячейки, выполняющей функции лазерного модуляционного устройства, определяет целевое назначение системы, в которой она применяется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акустооптический анализатор спектра / А. А. Андреев [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1992. – № 6. – С. 205.
2. Лазерное модуляционное устройство / В. В. Данилов // Приборы и техника эксперимента. – 1992. – № 4. – С. 236-237.
3. Электрооптические дефлекторы света / Б. Н. Гриб, И. И. Кондиленко, П. А. Коротков, Ю. П. Цященко. – Киев : Техника, 1980. – 206 с.

4. ИК радиометр для медицинской диагностики / В. В. Данилов, Г. В. Данилова, Т. В. Белик, В. Г. Плотниченко // ВОЛСПИ – 95 : тез. докл. VI Междунар. науч.-техн. конф. – Запорожье, 1995. – С. 16-17.
5. Третьяков И. А. Алгоритм расчета акустооптического устройства по виду электрооптической кривой / И. А. Третьяков, Т. В. Белик // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 2. – С. 9-19.
6. Третьяков И. А. Технология реализации акустооптических устройств / И. А. Третьяков, Т. В. Белик // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 3. – С. 11-15.
7. Оптические информационные технологии. Преобразование радиосигналов / И. А. Третьяков, М. Л. Павлов, Т. С. Гебенева, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2016. – № 2. – С. 83-90.
8. Данилов В. В. Акустооптические элементы межблочной волоконно-оптической связи для высокопроизводительных вычислительных средств / В. В. Данилов, Л. М. Роганов, А. В. Чуркин // ВОЛСПИ – 95 : тез. докл. VI Междунар. науч.-техн. конф. – Запорожье, 1995. – С. 32-35.
9. Кондратенков Г. С. Обработка информации когерентными оптическими системами / Г. С. Кондратенков. – Москва : Сов. радио, 1972. – 208 с.
10. Клюдзин В. В. Физические основы построения акустооптических устройств : учеб. пособие / В. В. Клюдзин ; Ленингр. ин-т авиац. приборостроения. – Ленинград, 1980. – 74 с.
11. Балакший В. И. Физические основы акустооптики / В. И. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. Е. Чирков. – Москва : Радио и связь, 1985. – 280 с.
12. Мустель Е. Р. Методы модуляции и сканирования света / Е. Р. Мустель, В. Н. Парыгин. – Москва : Наука, 1970. – 296 с.
13. Ярив А. Квантовая электроника : пер. с англ. / А. Ярив ; под ред. Я. И. Ханина. – 2-е изд. – Москва : Сов.радио, 1980. – 488 с.

Поступила в редакцию 15.11.2018 г.

CLASSIFICATION ANALYSIS OF ACOUSTIC CONTROL DEVICES FOR CONTROL OF A LASER BEAM

V. Ivanov, T. Belik

This article substantiates the introduction of new terms and definitions of acousto-optic devices, in which an acousto-optic cell is highlighted as a basic element. A classification of control devices for the laser beam of the optical range is proposed.

Keywords: acousto-optic cell; modulation; optical radiation; optical instrumentation; elastic-optical effect.

Иванов В. И.

инженер кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.

Ivanov V.

engineer at Department of physics and information and communication technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Белик Татьяна Владимировна

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

Belik Tatyana

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

УДК 621.383.51

**ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СТРУКТУРЕ НА ОСНОВЕ
ПЛЕНОК CVD – АЛМАЗА**

© 2018 *Е.Д. Ильяшенко, В.А. Сорока, В.И. Тимченко*

Обнаружен и исследован фотовольтаический эффект в тонкопленочных структурах, полученных на основе термически осажденных пленок алмаза (CVD-алмаз). Для алмазных пленок, осажденных на кремниевую подложку обнаружена генерация фото-ЭДС, проявляющаяся в широком оптическом диапазоне, включая видимую область спектра.

Ключевые слова: алмазная пленка; фотоприемник; фотоЭДС; световая эффективность.

Введение. Интерес к фотовольтаическим структурам, используемым в качестве источников электрического тока в солнечных элементах, обусловлен активным развитием альтернативной энергетики, основанной на возобновляемых источниках энергии. Развитие такой энергетики идет путем поиска компромисса между максимально достижимым КПД устройств для преобразования излучения, стоимостью технологии и материалов при массовом производстве солнечных элементов, а также устойчивостью к агрессивному воздействию внешней среды. С этой точки зрения весьма перспективны фотоприемники, изготовленные на основе алмазных материалов.

Постановка задачи. Анализ физических характеристик алмазов показали, что в них проявляются многие свойства, присущие широкозонным полупроводникам. Алмаз является фактически единственным материалом, который прозрачен в широком оптическом диапазоне. При этом он оказывается устойчивым в экстремальных условиях: практически это выражается в том, что кристалл не разрушается под влиянием мощного оптического облучения, сильного электрического поля (напряжение пробоя $\sim 10^7$ кВ/см), импульса тока или высоких температур.

Механизмы проводимости тонких алмазных пленок изучаются при помощи вольт – амперных характеристик (ВАХ). Электрические свойства пленок могут резко отличаться от свойств, ожидаемых лишь при учете только объемной проводимости. Электрические характеристики образцов определяются еще и типом контактов. Напряжение в несколько вольт способно создать в тонкой структуре пленок большие поля, ВАХ в которых могут иметь некоторые особенности. При исследовании ВАХ алмазных пленок, легированных бором [1] использовали два вида контактов *Au* и *Au/Ta*, которые изготавливались методом осаждения с помощью фотолитографии. Они наносились на поверхность пленки в виде концентрических окружностей, что позволяло убрать поверхностные токи. Измерения ВАХ показали, что контакты омические, как в отожженном, так и в осажденном состояниях. ВАХ пленок с контактами *Au* и *Au/Ta* показаны на рис.1 (*a* и *б* соответственно).

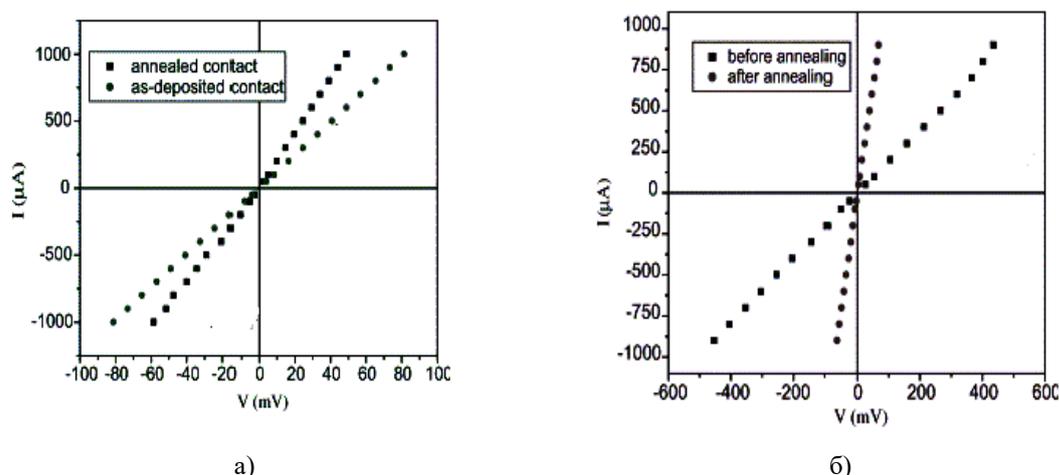


Рис. 1. ВАХ алмазных поликристаллических пленок с контактами Au (а) и Au/Ta (б) до и после отжига [1]

После отжига образцов, при температуре 500°C , значение тока увеличивалось, что было объяснено уменьшением удельного контактного сопротивления на 2-3 порядка, а также появлением карбидного слоя TaC , который возможно понижает высоту барьера между пленкой и Ta .

Однако, метод осаждения контактов с предварительной обработкой образцов создает на поверхности пленки много дефектов, по которым возможна поверхностная проводимость. При изучении ВАХ [2] кристаллов природного алмаза, легированного бором, синтетических монокристаллов и эпитаксиальных алмазных пленок, полученная ВАХ представляла собой зависимость тока от напряжения в виде $I = U^n$, где n непрерывно меняется. Если на начальных участках при напряжении на образце около 20В , $n \sim 10$, то при больших напряжениях кривая переходит в режим, где n может меняться от 2,2 до 3 на различных кристаллах. Инжекция в диэлектрический алмаз из легированной бором области при $n > 3$ может быть ограничена наличием некоторого энергетического распределения глубоких ловушек и зарядовым состоянием поверхности. Влияние заряда поверхности на характер токопереноса было установлено путем бомбардировки образцов низкоэнергетичными ионами кислорода. После такой обработки наблюдалось уменьшение величины тока и увеличения показателя степени n , что связывалось с изменением структуры поверхности.

ВАХ CVD-пленок показали наличие двух областей электропроводности линейную и суперлинейную [3], при различных способах послеростовой обработки (отжига или гидрирования), что подтверждает предположение о влиянии условий синтеза на параметры формирования электрически активных центров АП. Линейная область ВАХ наблюдается при малых полях, а нелинейная при больших, как показано на рис.2. Проводимость пленок составляла $\sim 10^{-6}\text{ См}\cdot\text{см}^{-1}$. После отжига при температурах $370 - 870\text{К}$ электропроводность пленок на линейном участке уменьшалась с повышением температуры отжига до $10^{-12}\text{ См}\cdot\text{см}^{-1}$. После отжига при температуре больше 670К и последующего гидрирования проводимость линейного участка не изменялась. Полученная энергия активации составляла $\sim 0,93\text{эВ}$, на которую не влияли ни отжиг, ни гидрирование. Предполагается, что основной механизм проводимости основан на активации мелких уровней или прыжковом туннелировании, т.е. доминирует проводимость Френкеля – Пула. На ВАХ пленок при высоких полях процессы термической обработки не влияют.

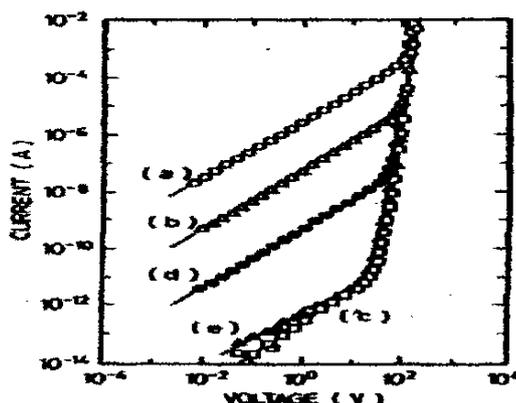


Рис. 2. ВАХ CVD - пленки при комнатной температуре: кривая (а), пленка отожжена при 570К кривая (b), пленка отожжена при 670К кривая (с) [3]

В работе [4] исследовались ВАХ АПП, выращенных на вольфрамовой подложке, толщина которых составляла $\sim 10\text{-}20$ мкм. Kontakтами к пленке служили: вольфрам (подложка) и проводящие клеи на основе серебра или аквадага. Измерения ВАХ показали линейную зависимость в интервале напряжений до 0,5В для обеих полярностей тока. Измерив частотные зависимости импеданса пленок между двумя омическими контактами, авторы оценили характер проводимости по объему поликристаллической пленки. В частности, предложено несколько возможных различных механизмов переноса тока по пленке: во-первых, по сетке межкристаллитных границ; во-вторых, по объему кристаллитов между которыми расположены барьеры, плохо проводящего материала. Таким образом, разнообразие вольт – амперных зависимостей в алмазных поликристаллических пленках обусловлено вкладами объемных и поверхностных электрически активных центров. Виды и энергетические характеристики этих центров непосредственно связаны с условиями CVD-метода.

Алмазные кристаллы характеризуются хорошей фоточувствительностью. Пик изучения фотоэлектрических свойств алмазов приходится на 60-е годы XX столетия. При этом исследовались изолирующие безазотные алмазы типа IIa и содержащие азот типа I [5-7], полупроводниковые типа IIb [8, 9], синтетические алмазы [10, 11] и эпитаксиальные алмазные пленки [12, 13]. Фотопроводимость поликристаллических пленок на чужеродных подложках все еще находится в стадии изучения.

Явление фотопроводимости широко применяется в фотоэлектрических устройствах (фоторезисторы, фотодатчики, фотоприемники, элементы оптоэлектроники оптоэлектронные пары и т.д.), в изготовлении которых применяются кристаллы полупроводников или тонкослойные структуры на основе пленок. С учетом присущих алмазу достоинств, отмеченных ранее, перед алмазными пленками открываются широкие перспективы для практического использования в оптоэлектронике. В основе фотопроводимости, как физического явления, лежит генерация неравновесных носителей в веществе под действием света. Отношение концентрации неравновесных носителей к концентрации равновесных, характеризующих темновую электропроводность, является определяющим для оценки фоточувствительности вещества. Для кристаллов алмаза чаще всего выполняется соотношение $\sigma_t \gg \Delta\sigma$, где σ_t - удельная темновая электропроводность, $\Delta\sigma$ - изменение электропроводности под действием света. Это соотношение, как правило,

определяет выбор способа регистрации фототока, возникающего в исследуемом образце под действием света. В большинстве ситуаций, возникающих при практическом исследовании фотопроводимости алмазов величины тока и фототока очень малы (\sim нА), что требует использования высокочувствительной измерительной аппаратуры.

Возникновение неравновесных носителей неразрывно связано с переходами носителей из заполненных уровней на свободные в результате поглощения света. Спектры поглощения кристаллов природных и синтетических алмазов отличаются разнообразием в широком оптическом диапазоне от 0,225 мкм до 25 мкм.

Подробно оптическое поглощение и связанная с ними фотопроводимость были рассмотрены в работах [14-16]. В результате спектральных исследований природных монокристаллических алмазов накоплен обширный экспериментальный материал по спектральной зависимости коэффициента поглощения. Результаты исследований представлены на рис.3. Видно, что наиболее интенсивное поглощение природного алмаза проявляется в ультрафиолетовой (УФ) до \sim 0,3 мкм и инфракрасной (ИК) в интервале 3-10 мкм областях. Полосы поглощения в ИК интервале обусловлены дефектами, образованными примесями. Видно, что в видимой и ближней ИК – области \sim 0,4–3 мкм алмазы прозрачны. Действительно, большинство природных алмазов в видимой области прозрачны. Но, также известно, существование окрашенных алмазов, что, несомненно, указывает на образование оптически активных центров с энергией возбуждения и в этом диапазоне. Однако, природа этих центров до сих пор является предметом для обсуждения.

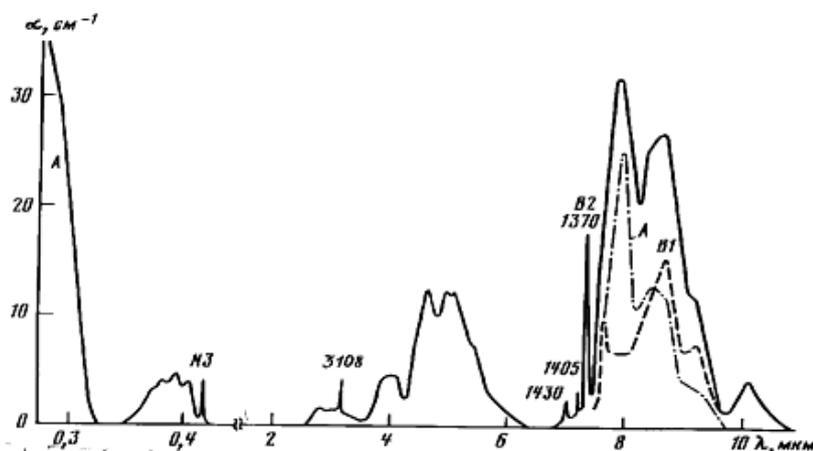


Рис. 3. Спектр поглощения алмазов [8]

В природных алмазах фотопроводимость чаще всего исследовалась в УФ – области, где проявляется фундаментальное поглощение. Выявленный фотоотклик в УФ – области позволил разработать фотоприемники рентгеновского и УФ – излучения. В ИК – диапазоне поглощение, обусловленное колебаниями атомов совершенного кристалла, к фотопроводимости обычно не приводит. Однако, фотоэлектрические исследования алмазных пленок, проведенные в работе [17], действительно показали проявление в «свободных» алмазных пленках фотоотклика в видимом и ближнем ИК-диапазонах. Этот эффект связывается со структурными нарушениями, которые присущи алмазным пленкам.

Поэтому, можно ожидать было бы ожидать проявление фотогенерации неравновесных носителей и для более сложных структур типа пленка-подложка. В

работе изучалась структура алмазная пленка - кремниевая подложка. В качестве прозрачного контакта использовался электролит на основе очищенной воды, удерживаемый приклеенной стеклянной ампулой. Схема приготовленного образца и его подключение проведена на рис.4. Свет направлялся нормально к поверхности пленки.

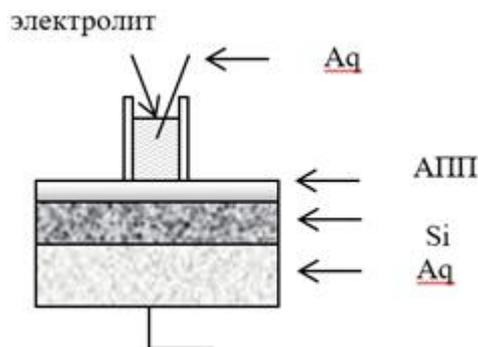


Рис.4. Схема подключения электролитного контакта к алмазной пленке

Экспериментальная установка состоит из двух принципиальных частей: первая формирует поток импульсного монохроматического излучения, сфокусированный на образце, а вторая представляет собой набор регистрирующего оборудования. В качестве источника излучения использовались лампы с вольфрамовой нитью увеличиваемым окном, для которых можно определить параметры спектра излучательной способности.

Так как полное сопротивление исследуемых образцов АПП достигало величины $\sim 10^9 \text{ Ом}$, а измерение приложенного напряжения между контактами проводилось с помощью цифрового вольтметра В7-38 с входным сопротивлением $R_{\text{вх}} = 10 \text{ Мом}$. Регистрация фото-Э.Д.С. осуществлялась электрометрическим усилителем У5-6 с входными сопротивлениями 10^6 , 10^8 , 10^{10} Ом , с помощью электрометра В7-30 и селективного усилителя У2-8.

Для получения воспроизводимых результатов образцы и проводники, подводящие напряжение, были защищены от влияния внешних электрических полей, воздействия освещения и факторов способных повлиять на температуру в измерительной камере. Блок-схема установки представлена на рис.5.

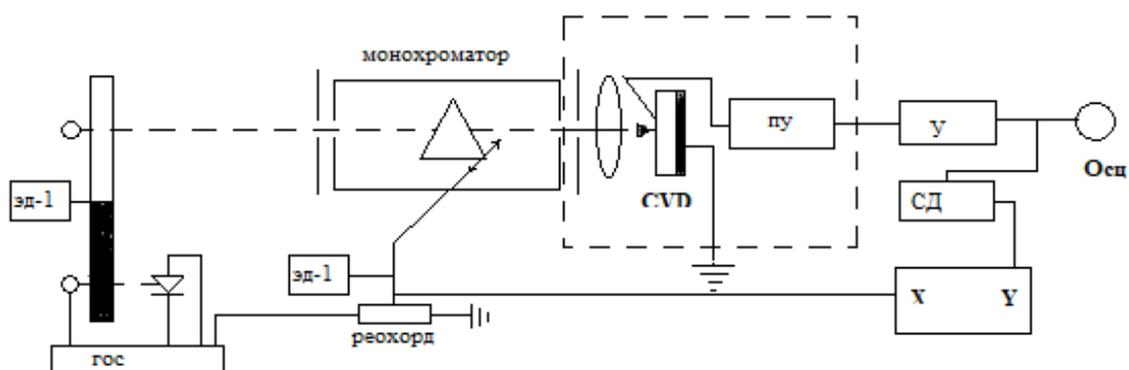


Рис.5. Блок-схема установки для исследования фотоэлектрических свойств высокоомных материалов

Данная экспериментальная установка позволяла исследовать спектральную зависимость фотоотклика при воздействии излучения в интервале длин волн 350-2000нм, в режиме стационарного и модулированного потока фотонов, а также получать информацию о кинетике изменения тока, происходящего, за время от 0,3 до 300 сек.

Основными ее узлами являются: ГОС – генератор опорного сигнала. ЭД1–привод модулятора, питание которого проводилось от стабилизированного источника тока с $\varepsilon \sim 2\%$; R_x – образец (в качестве образцов использовали Si, GaP, C, CVD–пленки); R_n – образцовое сопротивление величина которого достигала 4,7 МОм. ИСН – стабилизированный источник напряжения (с пределами изменения $U \sim 0-1100\text{В}$ ($\pm 0,2\%$)); > предусилитель; У- усилитель (в зависимости от конкретных исследований это мог быть широкополосный или электрометрический усилитель); СД- синхронный детектор для выделения модулированного сигнала по фазе и частоте; рА– измеритель тока; осциллограф; М–модулятор светового сигнала, параболическое зеркало, источник облучения, источник опорного сигнала; кварцевая линза; входная и выходная щели; Х-У- 2-х координатный потенциометр Н-306; Н-307.

В качестве монохроматора в работе использовался призмный блок с регулируемыми входной и выходной щелями от спектрофотометра СФ-4А. Сфокусированный на входной щели свет, проходя через систему поворотных зеркал и кварцевую призму, собирался на выходной щели и с помощью кварцевой линзы ($F=35\text{мм}$) выводился на образец R_x . Изображение выходной щели (ширина которой менялась от 0 до 2 мм), имело вид прямоугольника монохроматического излучения сфокусированного на поверхности образа. Высота изображения щели составляла 5 мм, а ширина менялась от 0.5 до 2.5 мм, в зависимости от установленной ширины щели.

Длина волны монохроматического излучения определялась по отсчету лимба прибора и могла быть установлена вручную или изменялась с помощью электропривода (РД), включающего реверсивный двигатель и 4-х скоростной понижающий редуктор. Синхронно с приводом поворота призмы изменялось положение ползунка многооборотного реохорда с сопротивлением 10кОм, а снимаемый с него сигнал обеспечивал смещение каретки двухкоординатного самописца Н-307 (координата Х). Средняя скорость сканирования спектра с помощью редуктора могла меняться в пределах $\frac{d\lambda}{dt} = 6,3 - 840\text{нм/мин}$.

При исследованиях влияния стационарного излучения на образцы, фотоотклик регистрировался электрометрическим усилителем типа У5-6 или В7-30. После усиления он преобразовывался в напряжение, которое было пропорционально величине тока в цепи образца. Значение тока при непрерывной записи определялось по положению пера самописца или по показаниям приборов. Регистрируемый ток для образцов АПП изменялся в широких пределах $\sim 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-3}\text{А}$.

В режиме модулированного излучения на вход монохроматора подавались импульсы света, имеющие вид трапеции, как показано на рис.6. Интервалы τ_1 , τ_2 и τ_3 - соответствуют временам нарастания, стабилизации и спада интенсивности света. Переменная составляющая напряжения, пропорциональная фототоку, снималась с нагрузочного сопротивления $R_n \ll R_x$ и подавалась на вход широкополосного усилителя У2-8, а затем на синхронный детектор. Преобразованный в постоянное напряжение сигнал, пропорциональный площади импульса фототока, регистрировался двухкоординатным самописцем.

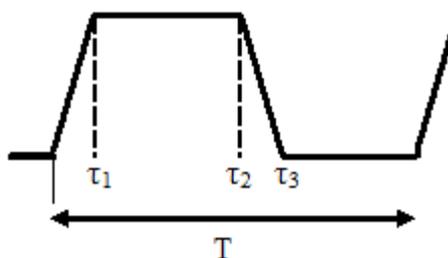


Рис. 6. Форма импульсов света модулированного излучения

Так как, тарированный режим работы используемого усилителя определен для синусоидальной формы входного сигнала, соотношение τ_1 , τ_2 и τ_3 выбиралось так,

чтобы $\frac{d I / I_o}{d \tau_1(\tau_3)} \approx \frac{2}{3} \tau_2 \approx \omega_{\text{усиления}}$. Здесь I – интенсивность потока, $\omega_{\text{усиления}}$ – резонансная частота усилителя.

Соотношение между τ_1 , τ_2 , и τ_3 зависело от числа и формы прорезей в диске модулятора (M). Изменяя количество прорезей модуляционного диска и скорость вращения привода, мы могли управлять частотой модуляции, которая регистрировалась частотомером. В используемой установке длительность освещения образца изменялась от 0,5 до 0,007с. Двигатель постоянного тока, используемый для привода модулятора, включался от стабилизированного источника тока со ступенчатой или плавной регулировками скорости вращения диска. Этот же модулятор служил источником опорного сигнала с амплитудой 450мВ для синхронного детектора КЗ-2. Генератор опорного сигнала был собран на основе миниатюрной лампы и фотодиода ФД-9 с транзисторным усилителем. В установке была предусмотрена также возможность регистрации динамики роста и спада фототока (кинетика фототока) в режимах стационарного и модулированного фотоотклика в виде временных разверток на диаграмме самописца или осциллограмм. Исходные данные, регистрируемые на экране осциллографа или диаграммной ленте двухкоординатного самописца, представляли собой кривые зависимости фотоотклика в абсолютных или относительных величинах тока, обусловленного длительностью освещения образца или длиной волны падающего излучения.

В отличие от совершенных кристаллов природного алмаза поликристаллические пленки начинают заметно поглощать свет при существенно меньших энергиях квантов, длинноволновая граница которого в АП простирается в видимую и ближнюю ИК – области. Это указывает на проявление эффектов с энергиями активации ~ 1 эВ. Природа оптически активных центров, их энергетическое размещение и влияние на перенос заряда до сих пор остается открытым вопросом. Поэтому, для анализа влияния излучения на процессы переноса заряда в АПП необходим источник излучения с непрерывным по спектру и достаточно мощным потоком фотонов. Этим требованиям удовлетворяют тепловые источники излучения – аналоги абсолютно черного тела.

Использованные в работе лампы с вольфрамовой нитью накаливания, как в стеклянных, так и в кварцевых баллонах, имели мощность от 100 до 400Вт. Питание ламп осуществлялось от специально изготовленного электронного блока со стабилизацией тока до 1,5%. Для каждой лампы проводилась контроль излучаемой мощности и температуры нити накала, которая определялась с помощью оптических пирометров "Проминь" и ПЭВ-80.

Излучение лампы, отраженное от параболического зеркала, фокусировалось на входной щели монохроматора. Спираль лампы ориентировалась таким образом, чтобы изображение ее витков на входной щели составляло сплошное светящееся тело. Параболическое зеркало путем переключения позволяло также направлять ультрафиолетовое излучение в монохроматор от дейтериевой лампы ДДС-30, для питания которой использовался переоборудованный универсальный источник питания УИИП-1. Использование таких тепловых источников на основе анализа спектров энергетической светимости, и излучательной способности материала позволяло получить спектральное распределение потока фотонов во всем диапазоне.

Особенности характеристик источников излучения стандартизованы и подробно рассмотрены в работах [18-20]. При достаточно высокой мощности потока излучения от тепловых источников в ближней инфракрасной области, их недостатком является весьма низкая (около 0,3%) излучательная способность в коротковолновом ($\lambda < 400\text{нм}$) диапазоне. Так как, обычно температура рабочего тела не превосходит 3000К, тепловые источники являются эффективными для использования в видимой и ближней инфракрасной области, в которой и проводились данные исследования. Спектральное распределение излучательной способности вольфрама, показано на рис. 7. Так как спектральная яркость излучения лампы с истинной температурой вольфрама для любой длины волны меньше, чем для АТЧ той же температуры, их отношение характеризуется коэффициентом излучательной способности вольфрама – ε , что учитывалось в работе. Вообще, величина ε зависит от температуры источника и длины волны. На рис.7 приведен график зависимости ε от длины волны при температуре нити накала 2800К.

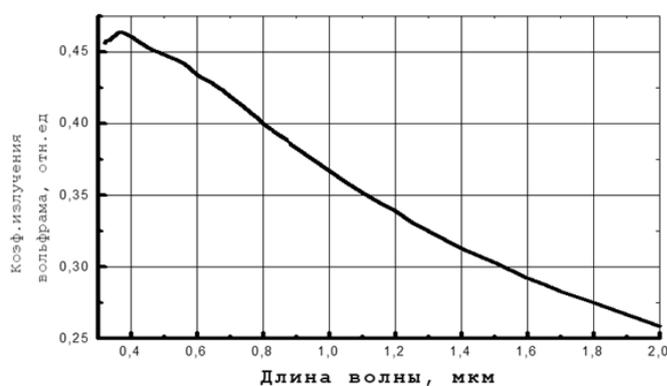


Рис.7. Спектральное распределение излучательной способности вольфрама при T=2800K

На величину потока энергии монохроматического света, падающего на образец, влияли температура и материал излучателя, параметры и конструктивные особенности монохроматора, свойства поверхностей отражающих и преломляющих световые лучи. Энергия излучения, попадающая на выходную щель монохроматора и достигающая образца, определялась исходя из взаимного размещения источника и приемника, формы рабочего тела, конструкциями фокусирующих элементов и т.д. В рассмотренной установке на входную щель шириной $\Delta l = 2$ мм попадала лишь часть ($n = 1/100$) полного излучения. Кроме того, часть излучения рассеивалась и поглощалась оптическими элементами самого монохроматора. С учетом линейной дисперсии $dl/d\lambda$ монохроматора (рис.8) по измеренным спектральным характеристикам источника (температура нити накала) проведена оценка (1) мощности монохроматического

излучения $W(\lambda, \Delta l, T)$ на выходной щели шириной Δl , а также количества числа фотонов $N(\lambda, \Delta l, T)$ в заданном интервале спектра

$$N(\lambda, \Delta l, T) = \frac{W(\lambda, \Delta l, T)}{h\nu} = \frac{\alpha I}{h\nu}, \quad (1)$$

где α – чувствительность фотоэлемента; I – регистрируемый фотоэлементом ток, $h\nu$ – энергия фотона

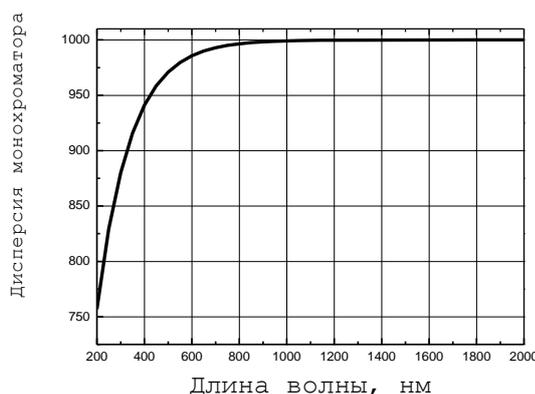
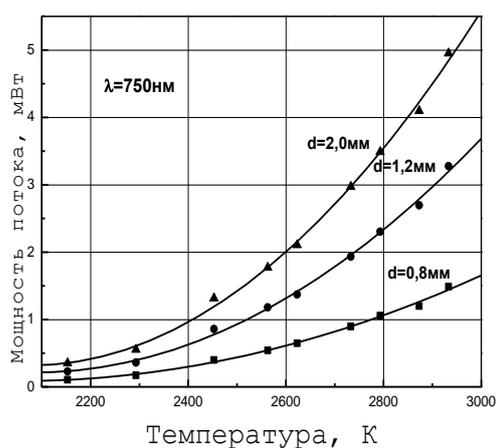
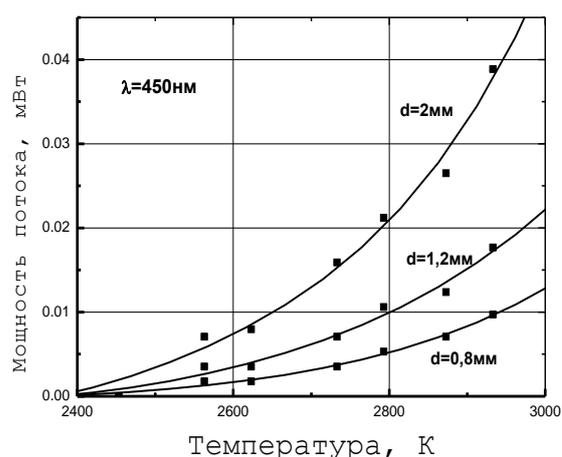


Рис.8. Линейная дисперсия используемого монохроматора

Для проведения прямых измерений мощности излучения, падающего на образец в работе использовался фотоэлемент Ф-1. Чувствительность этого фотоэлемента паспортизована для двух длин волн и равна - $\alpha_{750} = 10,5 \frac{\text{мкА}}{\text{мВт}}$ и $\alpha_{400} = 56,6 \frac{\text{мкА}}{\text{мВт}}$. Для монохроматического излучения с $\lambda_1 = 750$ нм, $\lambda_2 = 400$ нм были определены зависимости мощности $W(\lambda, \Delta l, T)$ потоков фотонов при изменении температуры излучателя (T) и ширины входной и выходной щелей (Δl) монохроматора. Соответствующие графики приведены на рис.9.



а) длина волны $\lambda = 750$ нм



б) длина волны $\lambda = 450$ нм

Рис.9. Температурная зависимость мощности потока фотонов, падающего на образец АПП

Соотношение $\frac{W(400, \Delta l, T)}{W(750, \Delta l, T)}$ составляет величину $\sim 0,065$, что весьма близко

аналогичному соотношению для АЧТ с учетом излучательной способности вольфрама. Таким образом, используемая в работе оптическая система с учетом дисперсии и излучательной способности вольфрама не вносила существенные изменения в спектральное распределение потока фотонов, который можно рассчитать по закону Планка

На рис.10 приведены три кривые спектральной зависимости фото-ЭДС для АПП при температурах источника с вольфрамовой нитью накаливания $T = 2053\text{K}$, 2500K , 2823K . Видно, что максимальное значение фотоотклика с повышением температуры источника смещается в сторону более коротких волн.

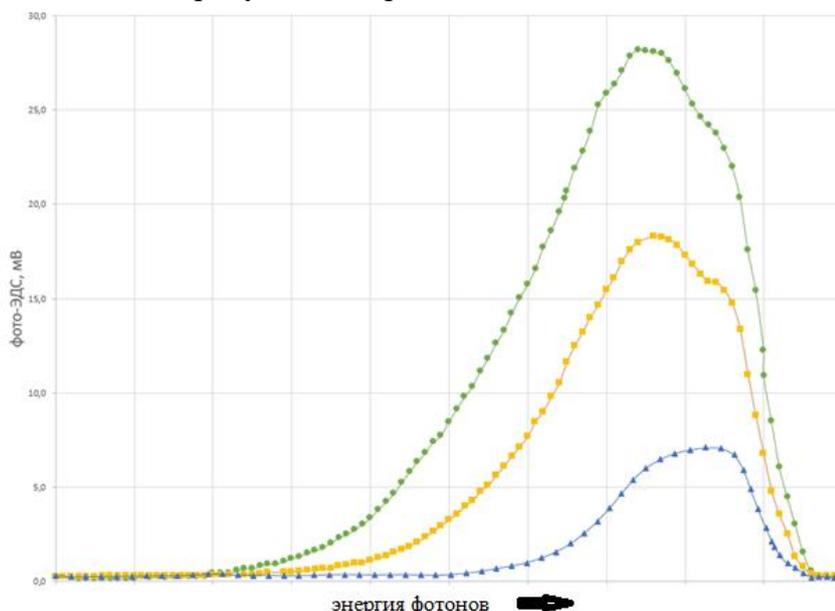


Рис.10. Спектральная зависимость фото-ЭДС АПП для разных температур источника

Из анализа зависимостей фото-ЭДС представленных на рис.10, можно считать, что положение максимума фототока зависит от характеристики образца (в частности, $\alpha(\nu)$ – коэффициента поглощения), и от характеристики самого источника излучения (плотность потока излучения, температура нити накала), что не учитывалось предыдущими исследователями. Таким образом, можно сделать вывод, что при увеличении температуры источника максимум фотоотклика смещается в сторону более коротких длин волн. Из рис.10 видно, что с ростом температуры возрастает значение фототока до максимального значения. В длинноволновом диапазоне фототок уменьшается. Отметим, что кривые не симметричны относительно максимума. На участке более коротких волн фототок резко возрастает до максимального значения, а затем в области более длинных волн спад кривой не такой крутой. Также заметно, что с повышением температуры источника положение максимума фототока смещается в сторону более коротких волн.

Таким образом, при известном положении максимума фототока можно определить температуру источника излучения. Этот эффект можно использовать при конструировании широкозонных пирометров и датчиков для определения температуры источников излучения, которые недоступны глазу человека, или же расположены в химически агрессивных средах.

Выводы. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Метод нестационарной фотопроводимости, при интенсивном облучении длиной волны, на которой излучение не вызывает межзонных переходов в совершенном алмазе, является перспективным для изучения населенности глубоких ловушечных уровней синтетического алмаза. Это прямой метод, который при комнатной температуре позволяет определить глубину залегания ловушечных уровней.

2. Метод фотопроводимости позволяет провести анализ свойств и качества поверхностных слоев алмазных пленок., метод нестационарной фотопроводимости, использованный для алмазных поликристаллических пленок (как в случаях широкозонных материалов) весьма эффективен. Он позволяет исследовать глубину залегания и параметры распределения глубоких ловушек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ohmic contacts to boron-doped diamond / Congmian Zhen [et al.] // Proceedings of the 8th International Conference on Electronic Materials, IUMRS-ICEM 2002 July-August. – 2003. – P. 117-121.
2. Электрофизические свойства синтетических алмазов и эпитаксиальных алмазных пленок, имплантированных ионами бора, и диэлектрическая электроника на алмазе / А. В. Денисенко [и др.] // Техника средств связи : тр. 1 Междунар. семинара по алмазным пленкам (30 июн. – 6 июл. 1991 г.). – Москва, 1991. – Вып. 4. – С. 101-109.
3. Electrical conduction mechanisms in polycrystalline chemically vapour-deposited diamond films / T. Sugino [et al.] // Diamond and Related Materials. – 1993. – Vol. 2, Is. 5-7, 13 April. – P. 797-802.
4. Пленки из синтетического полупроводникового алмаза как электродный материал электрохимии / Ю. В. Плесков [и др.] // Техника средств связи : тр. 1 Междунар. семинара по алмазным пленкам (30 июн. – 6 июл. 1991 г.). – Москва, 1991. – Вып. 4. – С. 171-178.
5. Pant D. D. The photoconductivity of diamond / D. D. Pant // Proc. Indian Acad. Sci., A. – 1944. – 19. – P. 315-333.
6. Татаринев В. С. Фотоэлектрическая спектроскопия природного алмаза / В. С. Татаринев // Алмаз в электронной технике : сб. ст. / под ред. В. Б. Кваскова. – Москва, 1990. – С. 110-127.
7. Denham P., Lightowers E.C., P.I.Dean Ultraviolet intrinsic and extrinsic photoconductivity of natural diamond.- Phys. Rev.,B, 1967, 161,v.3, p.762-768
8. Природные и синтетические алмазы / Г.Б.Бокий, Г.Н.Безруков, Ю.А.Клюев, А.М.Налетов, В.И. Непша // М. Наука,1986.С.221
9. Photoconductivity and relative properties of semiconducting diamonds / Jonson C. [et al.] // Phys. Rev. Solids. – 1964. – № 25. – P. 827-836.
10. Вишневский А. С. Электропроводность кристаллов синтетического алмаза / А. С. Вишневский, А. Г. Гонтарь // Синтетические алмазы. – 1977. – № 2. – С. 9-13.
11. Williams A.W.S. Impurity conduction in synthetic semiconducting diamond / A. W. S. Williams, E. C. Laghtowers, A. T. Collins // J. Phys. C. :Solid State Phys. – 1970. – 3, № 8. – P. 1727-1735.
12. Фотопроводимость и электронный парамагнитный резонанс в эпитаксиальных пленках алмаза / Н. Д. Самсоненко [и др.] // Синтетические алмазы. – 1977. – № 2. – С. 6-8.
13. Samsonenko N. D. Spectral dependence of Photoconductivity in Visible and Infrared Range on Epitaxial diamond / N. D. Samsonenko, V. V. Tokiy, V. I. Timchenko // Int. Conf. Diamond film-91, Abs. – Nice, France, 1991.
14. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов / С. М. Зи ; пер. с англ. под ред. А. Ф. Трутко. – Москва : Энергия. – 1973. – 656 с.
15. Блекмор Дж. Статистика электронов в полупроводниках : пер. с англ. / Дж. Блекмор ; под ред. Л. Л. Коренблита. – Москва : Мир, 1964. – 392 с.
16. Бьюб Ричард. Х. Фотопроводимость твердых тел / Р. Х. Бьюб ; пер. с англ. Ф. Я. Нады и В. И. Сидорова ; под ред. Т. М. Лифшица. – Москва : Изд-во иностр. лит., 1962. – 558 с.

17. Сорока В. А. Фотоэлектрические свойства поверхности (111) алмазных поликристаллических пленок : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 / В. А. Сорока ; Нац. акад. наук Украины ; Донец. физ.-техн. ин-т им. А. А. Галкина. – Донецк, 2007. – 17 с.
18. Ultrafast electronic processes in CVD diamond and GaAs: picosecond photoconductivity and high voltage switching / Garnov S. V. [et al.] // Proc. SPIE. – Vol. 3287. – 1998. – P. 67-77.
19. Zaitsev A. M. Optical Properties / A. M. Zaitsev // Handbook of Industrial Diamonds and Diamond Films / Ed. By M. A. Prelas, G. Popovici, L. K. Bigelow. – Boca Roca : CRC Press Inc, 1997. – P. 227-376.
20. Детекторы рентгеновского излучения, изготовленные на основе высокоомных поликристаллических пленок алмаза / В. Ф. Дворянkin [и др.] // Тонкие пленки в электронике : Материалы 7 Междунар. симп. – Москва-Йошкар-Ола, 1996. – С. 142-151.

Поступила в редакцию 08.11.2018 г.

PHOTOVOLTAIC EFFECT IN THE STRUCTURE BASED ON THE FILMS OF CVD DIAMOND

E.D. Ilyashenko, V.A. Soroka, V.I. Timchenko

The photovoltaic effect in thin-film structures was found and investigated. These structures were obtained on the basis of thermally deposited diamond films (CVD-diamond). For diamond films deposited on silicon substrate detected by the thermo-EMF generation, which manifests itself in a wide optical range including the visible region of the spectrum. The photovoltaic effect in thin-film structures was found and investigated. These structures were obtained on the basis of thermally deposited diamond films (CVD-diamond). For diamond films deposited on silicon substrate detected by the thermo-EMF generation, which manifests itself in a wide optical range including the visible region of the spectrum.

Keywords: diamond film, the photo-detector, photo-EMF, the efficiency of light

Ильяшенко Евгений Дмитриевич

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

Moiseev Oleg Igorevich

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

Сорока Валентина Афанасьевна

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

Soroka Valentina Afanasyevna

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

Тимченко Владимир Иванович

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

Vladimir Ivanovich Timchenko

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

УДК 004.386, 535.8

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ИМПУЛЬСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

© 2018 В.А. Гмыря, В.В. Данилов

Исследована структура поля при распространении электромагнитных волн оптического диапазона, несущих информацию, через пространство ограниченное двумя параллельными плоскостями. Показано, что поле в произвольной точке пространства определяется как свертка поля известного в оправленной плоскости, с импульсной характеристикой слоя пространства. Сделано предположение о необходимости в зависимости от структуры поля в заданной плоскости и ширины слоя пространства различения приближений: «тени», Френеля, Фраунгофера.

Ключевые слова: пространство ограниченное параллельными плоскостями (слой пространства), комплексный коэффициент передачи пространства, амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики пространства.

Введение. Время обработки информации в оптических системах определяется скоростью распространения электромагнитных волн. В работе [1] было показано, что пространство, ограниченное двумя параллельными плоскостями (слой пространства) – инвариантная система, математическая модель которой может быть эквивалентна известным в радиоэлектронике коэффициенту передачи и импульсной характеристике. В работе [2, 3] показаны преимущества оптических информационных технологий, основанные на физических явлениях когерентности электромагнитного поля волн как носителя информации, перед возможностями электрических сигналов. В работах [4, 5] проведен анализ известных явлений физической оптики, потенциально пригодных для создания элементной базы оптических вычислителей, в частности, неуправляемых устройств ввода информации в оптические вычислители (модуляторы). Показано, что носителем информации в оптических информационных технологиях является электромагнитное поле.

Импульсная характеристика. Физический смысл импульсной характеристики состоит в том, что она представляет собой поле точечного источника, моделью которого может служить маленькое прямоугольное отверстие в плоском экране с большой интенсивностью поля в отверстии (рис.1). Т.е., импульсная характеристика, определяет поле в произвольной точке x, y, z , создаваемое двумерным точечным источником $U(x, y, 0) = \delta(x)\delta(y)$.

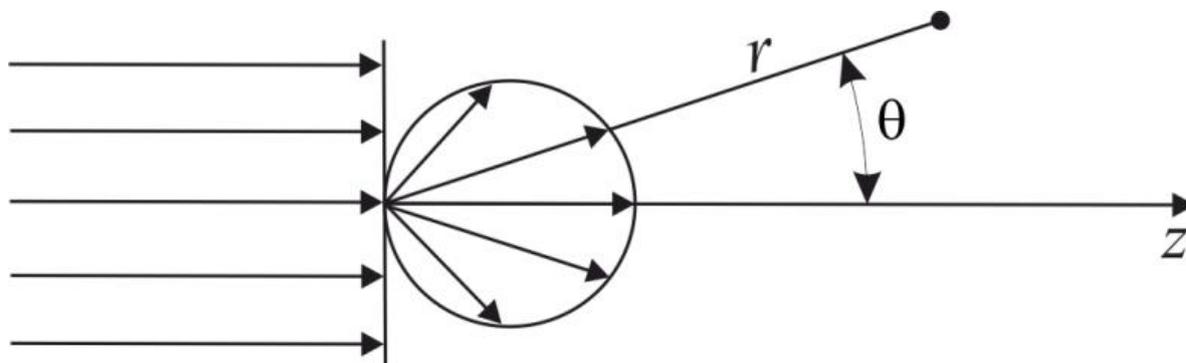


Рис. 1. Поле точечного источника

В соответствии [6, 7], спектральная плотность точечного источника в плоскости $z = 0$ определяется в виде:

$$G(\omega_1, \omega_2, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x)\delta(y)e^{-i(\omega_1 x + \omega_2 y)} dx dy = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x)e^{-i\omega_1 x} dx \int_{-\infty}^{\infty} \delta(y)e^{-i\omega_2 y} dy$$

Учитывая, что спектральная плотность одномерной дельта - функции Дирака равна единице, то и $G(\omega_1, \omega_2, 0) = 1$, откуда следует, спектральная плотность на выходе пространства ограниченного параллельными плоскостями (слоя) равна коэффициенту передачи, а поле точечного источника будет равно обратному преобразованию Фурье от коэффициента передачи, т. е. импульсной характеристике. Далее рассмотрим поле двумерного точечного источника (импульсную характеристику слоя пространства).

Сферическая система координат. Установим вид оператора d/dz в этой системе. Так как $\frac{d}{dz} = \frac{dr}{dz} \cdot \frac{d}{dr} = \frac{2\pi}{2\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \frac{d}{dr} = \frac{z}{r} \cdot \frac{d}{dr}$, $z = r \cos\theta$, тогда

$\frac{d}{dz} = r \cos\theta \frac{d}{dr}$. Тогда выражение для импульсной характеристики [1], примет вид:

$$h(r, \theta, \varphi) = -\frac{1}{2\pi i} r \cos\theta \frac{d}{dr} \left(\frac{e^{ikr}}{r} \right), \text{ или } h(r, \theta, \varphi) = -\frac{k}{2\pi i} \cos\theta \frac{e^{ikr}}{r} \left(1 - \frac{1}{ikr} \right). \quad (1)$$

Найденное значение $h(r, \theta, \varphi)$, позволяет получить следующие выводы:

- поле двумерного источника не является функцией φ и обладает круговой симметрией по оси z ;

- распределение поля содержит два слагаемых, при увеличении расстояния одно из слагаемых убывает по закону $1/r$, другое, соответственно как $1/r^2$;

- первое слагаемое характеризует поле излучения, а второе — индукционное (квазистатическое) поле. Распределение поля излучения следует из (1), предполагая что

$1 - 1/(ikr) \approx 1$. Это следует из выражения $1 - \frac{1}{ikr} = \sqrt{1 + \frac{1}{k^2 r^2}} e^{i \arctg \frac{1}{kr}}$, однако оно

выполняется, когда $\frac{1}{kr} \ll 1$, или $\frac{1}{kr} \gg 1$. Система неравенств справедлива уже при $r \approx \lambda$

, следовательно, поле излучения существует даже на малом расстоянии от источника, а поле излучения точечного источника определяется в виде:

$$h(r, \theta, \varphi) \approx \frac{k}{2\pi i} \cos\theta \frac{e^{ikr}}{r}. \quad (2)$$

Множитель $\cos\theta$, определяет вид диаграммы направленности, значению $\theta = 0$ соответствует максимум излучения, а при $\theta = \pi/2$ излучения нет. В качестве геометрической модели диаграммы направленности можно представить как шар, который касается плоского листа в точке, где находится точечный источник;

- для нахождения поля источника в параксиальном приближении (вблизи оси z), положим $\theta = 0$; $\cos\theta = 1$, тогда:

$$h(r, \theta, \varphi) \approx \frac{k}{2\pi i} \cdot \frac{e^{ikr}}{r}. \quad (3)$$

Для сферической волны, возможно приближение $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = r \approx z + \frac{x^2 + y^2}{2z}$, в связи с чем закономерно следующее простое выражение:

$$h(x, y, z) = ae^{ik \frac{\rho^2}{2z}}, \quad (4)$$

где $\rho^2 = x^2 + y^2$ и в множитель «а» включены все члены, не зависящие от x и y ;

- при $kr \ll 1$ или $r \ll \lambda / (2\pi)$, индукционное поле описывается как

$$h(r, \theta, \varphi) \approx \frac{\cos\theta}{2\pi} \cdot \frac{e^{ikr}}{r}.$$

Приближение Френеля. Уравнение описывающее поле в произвольной точке, будучи переписано с учетом (1, 2), представление в виде:

$$U(x, y, z) = \frac{kz}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta, 0) \frac{e^{ik\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}}}{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2} \left(1 - \frac{1}{ik\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}} \right) d\xi d\eta, \quad (5)$$

сложно для восприятия. Кажется целесообразным его несколько упростить, так как существуют области пространства, в которых поля носят качественно различный характер. Рассмотрим *поле излучения*. Учитывая, что для него $kz \gg 1$, и $k\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2} \gg 1$ каковы бы ни были ξ и η , отбрасывая в скобке второй член в формуле (5) (33), получим уравнение:

$$U(x, y, z) = \frac{kz}{2\pi i} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta, 0) \frac{e^{ik\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}}}{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2} d\xi d\eta, \quad (6)$$

отвечающее «приближению поля излучения». Более глубокие упрощения связаны с дополнительными ограничениями, накладываемыми на интересующую нас область пространства. Отметим, что поле в плоскости $z = 0$ в реальности, будет локализовано в ограниченной части пространства, поэтому пределы интегрирования можно заменить конечными величинами. Перепишем (6) в виде:

$$U = \frac{kz}{2\pi i} \int_{-a}^a \int_{-b}^b U(\xi, \eta, 0) \frac{e^{ik\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}}}{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2} d\xi d\eta.$$

Предполагаем, что эффективная часть поля в плоскости $z = 0$ заключена в прямоугольнике со сторонами $2a$ и $2b$. Размеры исследуемой области пространства между двумя параллельными плоскостями, зависят от трех факторов: размеров источника (прямоугольник $2a \times 2b$); расстоянием z от источника; расстояниями x и y от оси z .

Исследуем поле на расстоянии z от источника. Сделаем представление $\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}$ в виде $z\sqrt{1 + \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{z^2}}$, допустим малость величины $\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{z^2}$. Подвергнем разложению квадратный корень в степенной ряд по этой величине. В результате получим выражение:

$$\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2} = \left\{ 1 + \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2z^2} - \frac{1}{8} \left[\frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2z^2} \right]^2 + \dots \right\}.$$

При ограничении двумя первыми членами ряда, получим приближенное равенство:

$$\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2} \approx \left[1 + \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2z^2} \right], \quad (7)$$

причем погрешность в выражении не превосходит величины $(1/8) \cdot (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 / (2z^2)$, вследствие того, что ряд Тейлора в фигурной скобке, знакопеременный. Для аппроксимации импульсной характеристики воспользуемся равенством (7):

$$h(x-\xi, y-\eta, z) = \frac{k}{2\pi i} \frac{e^{ik\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}}}{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}$$

При достаточно больших z , знаменатель можно принять равным z^2 : $h(x-\xi, y-\eta, z) = \frac{k}{2\pi i z} e^{ik\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}}$. Видно, что наиболее точно следует аппроксимировать аргумент импульсной характеристики. При определении уравнения поверхности равных фаз функции $e^{ik\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2}}$, воспользуемся равенством $(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2 = C^2$. Откуда видно, что это сфера радиуса C с центром в точке ξ, η . Учитывая равенство 6, получаем:

$$h(x-\xi, y-\eta, z) = \frac{k}{2\pi i z} e^{ik \left[z + \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2z} \right]}. \quad (8)$$

Поверхность равных фаз определим в виде $z + \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2z} = C_1$. Определение погрешности принятого приближения выясним по степени отличия этой поверхности от сферической. Пусть при $x = \xi$ и $y = \eta$ обе поверхности пересекаются, тогда $C_1 = C$. Сокращая форму записи, обозначим $(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 = \sigma^2$. Тогда уравнения сферической поверхности и аппроксимирующей ее поверхности принимают вид $\sigma^2 + z^2 = C^2$ и $z + \frac{\sigma^2}{2z} = C$. Представим последнее уравнение в форме $\sigma^2 / (C/\sqrt{2})^2 + (z - C/2)^2 / (C/2)^2 = 1$. Из выражения видно, что это эллипс с

полуосями $C/\sqrt{2}$ и $C/2$ с центром в точке $(0, C/2)$. В системе координат σ, z изображена окружность, построенная в соответствии с уравнением $\sigma^2 + z^2 = C^2$, и эллипс (рис. 2).

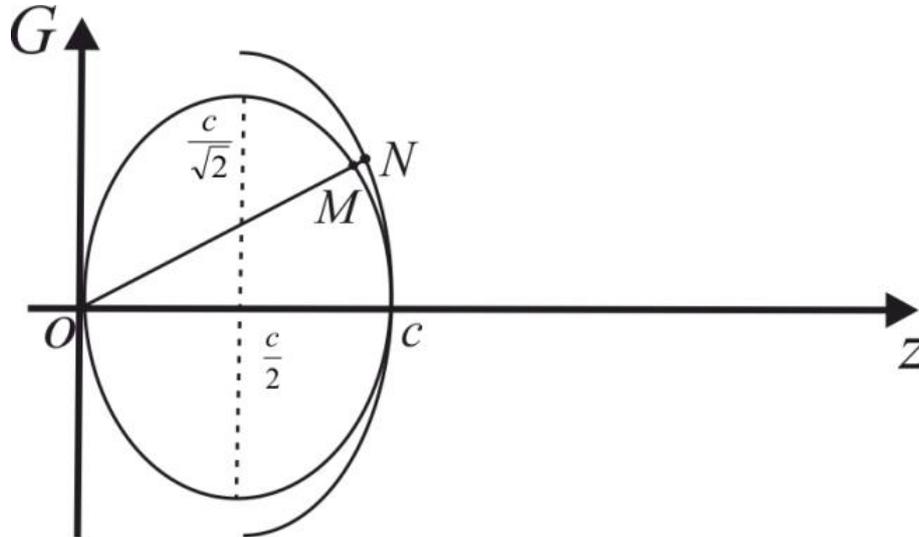


Рис.2. Окружность, построенная в соответствии с уравнением и эллипс

Окружность радиуса $C/2$ и близкий к ней эллипс с полуосями $C/2$ и $C/\sqrt{2}$. Для сферы, поверхностью приближения является эллипсоид вращения. Через центр сферы проведем прямую ON . Пересечение ее с поверхностями будет в точках M и N . Поверхности будут близки друг к другу, когда отрезок MN мал. Воспользовавшись критерием Релея сферическую поверхность можно заменить эллиптической [8], если MN не превышает $1/10$ длины волны. Если координатами точки M будут σ и z , $MN = ON - OM$, а так же $ON = C$, $OM = \sqrt{\sigma^2 + z^2}$ то:

$$MN = C - \sqrt{\sigma^2 + z^2} = C - z \left(1 + \frac{\sigma^2}{2z^2} - \frac{1}{8} \cdot \frac{\sigma^4}{z^4} + \dots \right) = C - z - \frac{\sigma^2}{2z^2} + \frac{1}{8} \cdot \frac{\sigma^4}{z^4}.$$

Из уравнения эллипса найдем $z = C - \sigma^2 / 2z^2$ и, подставив в последнее равенство, получим $MN = \frac{1}{8} \cdot \frac{\sigma^4}{z^4} + \dots$. Воспользовавшись этим приближением, а также критерием Релея, получаем $\frac{\sigma^2}{(8z^2)} \leq 0,1\lambda$, откуда $\sigma^4 \leq 0,8z^3\lambda \approx z^3\lambda$ или:

$$(\sigma/\lambda)^4 \leq (z/\lambda)^3. \quad (9)$$

От двух переменных ξ и η , зависит σ , которым необходимо присвоить такие значения, чтобы (9) соблюдалось почти всегда. При $x > 0$ и $y > 0$ необходимо принять $\xi = -a$; $\eta = -b$. Тогда получим:

$$\sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2} \leq z^4 \sqrt{\frac{\lambda}{z}}. \quad (10)$$

Область значений переменных x , y и z , удовлетворяющих неравенству (10), называется областью Френеля, и ей свойственно:

$$\sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2} \approx [z + \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2z}],$$

тогда выражение, описывающее импульсную характеристику пространства ограниченного параллельными плоскостями будет иметь вид:

$$h(x-\xi, y-\eta, z) = \frac{k}{2\pi iz} e^{ikz} e^{ik \frac{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}{2z}}. \quad (11)$$

Исходя из чего, выходной сигнал определяет выражение:

$$U(x, y, z) = \frac{k}{2\pi zi} e^{ikz} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta, 0) e^{ik[(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]} d\xi d\eta. \quad (12)$$

Выражение (12) описывает приближение Френеля, и справедливо, при выполнении условия:

$$\sigma = \sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2} \leq z^4 \sqrt{\frac{\lambda}{z}}. \quad (13)$$

На рис. 3 показан процесс нахождения σ . Примем $R = \sqrt{a^2 + b^2}$ параметр, характеризующий размер источника излучения. Согласно рис. 3(8) видно, что $R + \rho \geq \sigma$. Заменяв в (13) σ большей величиной $R + \rho$, ограничим расстояние z :

$$z^4 \sqrt{\lambda/z} > R + \rho, \quad (14)$$

соблюдение которого удовлетворяет и неравенство (13).

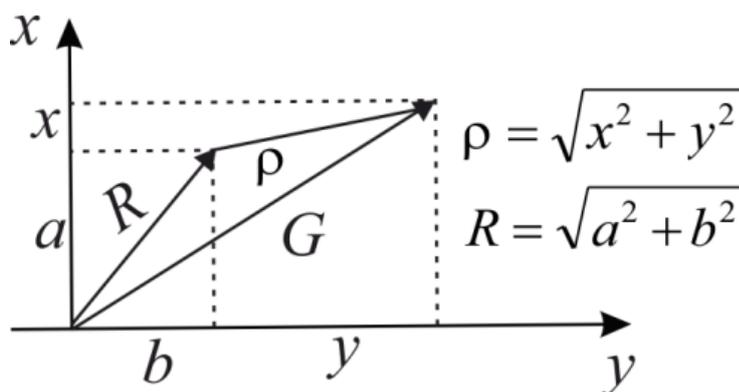


Рис. 3. Процесс нахождения σ к выражению (13)

Преобразовав (14) к виду:

$$\sqrt[4]{\lambda/z} > (R + \rho)/z, \quad (15)$$

делаем заключение, что в области Френеля корень четвертой степени из отношения длины волны к расстоянию от источника не меньше угла, под которым виден отрезок длины $R + \rho$ на расстоянии z от него.

В области Френеля импульсная характеристика $h(x, y, z)$ согласно (8) принимает вид:

$$h(x, y, z) = \frac{k}{2\pi iz} e^{ikz} e^{ik \frac{x^2+y^2}{2z}}, \quad (16)$$

которой соответствует коэффициент передачи:

$$K(\omega_1, \omega_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{k}{2\pi iz} e^{ikz} e^{ik \frac{z^2+y^2}{2z}} e^{i(\omega_1 x + \omega_2 y)} dx dy = \frac{k}{2\pi iz} e^{ikz} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik \frac{z^2}{2z} + i\omega_1 x} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ik \frac{y^2}{2z} + i\omega_2 y} dx dy.$$

Воспользовавшись соотношением [9, 10]: $\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\alpha x^2 \pm \beta x} dx = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} e^{\frac{\beta^2}{4\alpha}}$, найдем:

$$K(\omega_1, \omega_2) = e^{ikz - iz \frac{\Omega^2}{2k}}, \quad \Omega^2 = \omega_1^2 + \omega_2^2.$$

Рис. 4 иллюстрирует зависимость модуля и фазы коэффициента передачи от частоты Ω . Модуль коэффициента передачи $|K(\omega_1, \omega_2)| = 1$ постоянен, а фаза $\varphi = kz - \frac{\Omega^2}{2k} z$ изменяется по квадратичному закону.

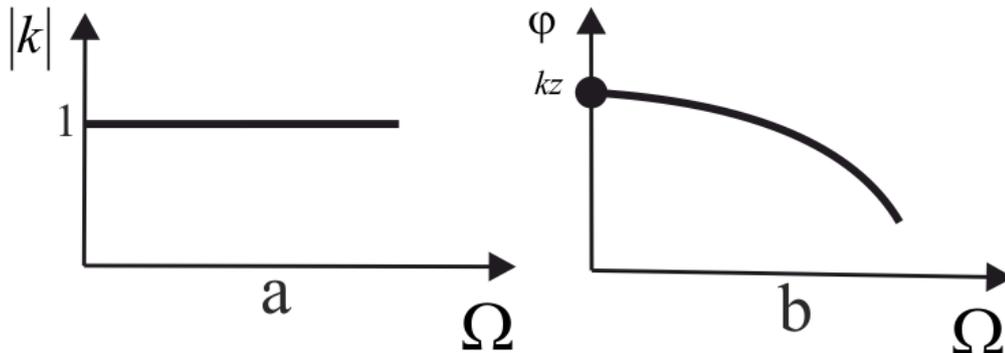


Рис. 4. Характеристики пространства ограниченного двумя параллельными плоскостями в приближении Френеля: а - амплитудно-частотная; б - фазо - частотная

Сравним полученное приближенное выражение (15) с точным $K(\Omega) = e^{iz \sqrt{k^2 - \Omega^2}}$, для чего используем ряд:

$$\sqrt{k^2 - \Omega^2} = k \left(1 - \frac{\Omega^2}{2k^2} + \frac{\Omega^4}{8k^4} - \dots \right),$$

Приняв $k \gg \Omega$, ограничимся первыми двумя членами $\sqrt{k^2 - \Omega^2} = k - \frac{\Omega^2}{2k}$. Тогда

$K(\Omega) = e^{ikz - iz \frac{\Omega^2}{2k}}$, что совпадает с формулой (15), а поле в произвольной точке определится выражением:

$$U(x, y, z) = \frac{e^{ikz}}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega_1, \omega_2, 0) e^{iz \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{2k}} e^{i(\omega_1 x + \omega_2 y)} d\omega_1 d\omega_2. \quad (17)$$

Это справедливо в области интегрирования $k \gg \Omega$. Действительно это неравенство должно соблюдаться для наивысшей частоты спектра Ω_{\max} зависящей от размера наименьшей неоднородности l_{\min} распределения поля в плоскости $z = 0$: $\Omega_{\max} \approx 2\pi/l_{\min}$. Вспомнив, что приближение Френеля для коэффициента передачи справедливо в том случае, когда $\frac{k\Omega_{\max}^4}{8k^4} z \leq 0,1 \cdot 2\pi$. Отсюда получим $\sqrt[4]{\lambda/z} \geq \lambda/l_{\min}$, т. е. корень четвертой степени из отношения длины волны к расстоянию z от источника излучения должен быть не меньше отношения длины волны к размеру наименьшей нерегулярности поля в плоскости $z = 0$.

Итак, получено два условия (15) и (16), соблюдение которых приводит к справедливости приближения Френеля. Первое устанавливает нижнюю границу для z : $z \geq \sqrt[3]{(R + \rho)^4 / \lambda}$, второе, верхнюю $z \leq l_{\min}^4 / \lambda$. При перекрытии областей, т.е. $\sqrt[3]{(R + \rho)^4 / \lambda} \leq l_{\min}^4 / \lambda^3$, или $R + \rho \leq l_{\min}^3 / \lambda^2$, приближение Френеля приводит к совпадению результатов на всей оси z .

Приближение Фраунгофера. Если размеры источника излучения малы, а расстояние z велико, в выражении $[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2] / (2z)$ членами второго порядка малости пренебрегают относительно переменных ξ и η . Тогда $\frac{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2}{2z} = \frac{x^2 + y^2}{2z} - \frac{x\xi + y\eta}{z}$, а выражение для поля в произвольной точке принимает вид:

$$U(x, y, z) = \frac{k}{2\pi iz} e^{ikz} e^{ik \frac{x^2 + y^2}{2z}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\xi, \eta, 0) e^{-i \frac{kx}{z} \xi - i \frac{ky}{z} \eta} d\xi d\eta. \quad (18)$$

Сравнение (18) с прямым преобразованием Фурье (ППФ) показывает, что двумерный интеграл в формуле (18) - спектральная плотность функции $U(x, y, z)$, при этом роль частот играют величины:

$$\omega_1 = \frac{kx}{z}, \quad \omega_2 = \frac{ky}{z}. \quad (19)$$

В оптических информационных технологиях, (18) носит название приближения Фраунгофера, и показывает, что, поле в произвольной точке пропорционально спектральной плотности распределения поля в плоскости $z = 0$.

$$U(x, y, z) = \frac{k}{2\pi iz} e^{ikz} e^{ik \frac{x^2 + y^2}{2z}} G\left(\frac{kx}{z}, \frac{ky}{z}, 0\right), \quad (20)$$

причем модуль $U(x, y, z)$ определяется в виде $|U(x, y, z)| = \frac{k}{2\pi z} \left| G\left(\frac{kx}{z}, \frac{ky}{z}, 0\right) \right|$.

Область Фраунгофера. Определим условия справедливости приближенного выражения (20). Пренебрегая членом $(\xi^2 + \eta^2)/(2z)$, сделаем допущение максимальной погрешности в фазе, согласно выражения $k(a^2 + b^2)/(2z)$. Следуя критерию Релея, получаем $k(a^2 + b^2)/(2z) \leq 0,1 \cdot 2\pi$, откуда следует:

$$2R/z \leq 0,8\lambda/(2R). \quad (21)$$

Угол, под которым виден источник излучения на расстоянии z , определяется отношением радиуса источника излучения $R = \sqrt{a^2 + b^2}$ к расстоянию z . Таким образом, дифракция Фраунгофера наблюдается на таких расстояниях, при которых угловой размер неоднородности поля меньше отношения длины волны к линейному размеру этой неоднородности.

Если в формуле (21) коэффициент 0,8 заменить 1, то можно записать:

$$2R \leq \sqrt{\lambda z}, \quad (22)$$

т.е. в области Фраунгофера расстояние z таково, что линейный размер неоднородности поля в плоскости $z = 0$ не больше среднего геометрического между длиной волны и расстоянием z . Область Френеля определяется приближенным соотношением $2R \leq \sqrt{\lambda z^3} / \lambda$. Так как $z \geq \lambda$, то область Френеля шире области Фраунгофера.

Пусть в области на $\lambda = 10^{-6}$ м в плоскости $z = 0$ размер неоднородности поля $2R = D = 1$ мм $= 10^{-3}$ м, тогда дифракция Френеля будет наблюдаться на расстоянии $z \geq \sqrt[3]{D^4 / \lambda} = 10^{-2}$ м $= 1$ см, а дифракция Фраунгофера на расстоянии $z \geq D^2 / \lambda = 1$ м. При увеличении размера оптической неоднородности в 10 раз, и если принять D равным 1 м, то эти расстояния составят соответственно 20 см и 100 м. Приведенные данные показывают, что приближением Фраунгофера можно пользоваться на больших расстояниях z .

В диапазоне сантиметровых волн примем $D = 1$ м, $\lambda = 1$ см. Дифракция Френеля будет при $z \geq 10$ м, а дифракция Фраунгофера при $z \geq 30$ м. Обычно (но не всегда) в сантиметровом диапазоне волн представляют интерес значительно большие расстояния, в этих областях наблюдается дифракция Фраунгофера.

Если область пространства лежит вблизи оси z так что:

$$k \frac{x^2 + y^2}{2z} \leq 0,1 \cdot 2\pi, \quad (23)$$

или $\sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{1}{2} \sqrt{\lambda z}$, то в выражении (18) можно опустить член, содержащий вторые степени x и y . В таком случае поле в произвольной точке имеет вид:

$$U(x, y, z) = AG(kx/z, ky/z, 0), \quad (24)$$

где $A = ke^{ikz}/(2\pi iz)$ коэффициент, не зависящий от x и y ; $G(\omega_1, \omega_2, 0)$ - спектральная плотность распределения поля в плоскости $z = 0$, $\omega_1 = \frac{kx}{z}$, $\omega_2 = \frac{ky}{z}$.

В теории антенно-фидерных устройств [9, 10], известно, что на сантиметровых и более длинных волнах неравенства (22) и (23) как правило, выполняются. Можно

сказать, что пространство, заключенный между антенной и параллельной ей плоскостью, в котором существует поле, обладает свойством изменять поле в соответствии с преобразованием Фурье, а диаграмма направленности, есть спектральная плотность от распределения поля в раскрыве антенны

Приближение «тени». При большом значении расстояния z , поле можно найти, исходя из приближения Френеля или приближений Фраунгофера (12) или (24), в зависимости от того, какое из неравенств (10), (22) или (23) выполняется.

Зачастую, существует потребность знать поле вблизи различного рода неоднородностей. В оптических информационных технологиях роль неоднородностей играют диафрагмы, транспаранты, линзы, зеркала, дифракционные решетки и т. п. Предполагая, что поле на граничной поверхности известно, необходимо найти поле на малом расстоянии z от этой поверхности.

Пусть граничной поверхностью является плоскость $z = 0$, также известно поле в этой плоскости $U(x, y, z)$. Будем искать поле $U(x, y, z)$ при условии, что z мало. Известно [8, 10], решение такой задачи:

$$U(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \iint G(\omega_1, \omega_2, 0) e^{ik\sqrt{k^2 - \omega_1^2 - \omega_2^2}} e^{i\omega_1 x - i\omega_2 y} d\omega_1 d\omega_2.$$

Воспользуемся разложением в ряд [10]: $z\sqrt{k^2 - \Omega^2} = kz - z\Omega^2/(2k) + \dots$. При использовании только первого члена kz , допустимая погрешность в аппроксимации, не превысит $z\Omega_{\max}/(2k)$. При условии, что эта величина не больше $0,1(2\pi)$, подынтегральное выражение можно привести к упрощенному виду:

$$U(x, y, z) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega_1, \omega_2, 0) e^{ikz} e^{i\omega_1 x - i\omega_2 y} d\omega_1 d\omega_2.$$

Если вынести e^{ikz} из под интеграла, то оставшееся выражение представляет собой обратное преобразование Фурье (ОПФ) от распределения поля в плоскости $z = 0$, поэтому $U(x, y, z) = e^{ikz}U(x, y, 0)$, т.е. поле можно представить в виде:

$$U(x, y, z) = e^{ikz}U(x, y, 0). \quad (25)$$

Таким образом, при принятом приближении $z\Omega_{\max}/(2k) \leq 0,2\pi$, поле в плоскостях, перпендикулярных оси z , распределено точно так же, как и в плоскости $z = 0$. Множитель вида e^{ikz} учитывает лишь набег фазы, происшедший при распространении волны между двумя плоскостями, а выражение (25) получило название приближения «тени».

Наибольшая частота спектра Ω_{\max} является функцией величины размера минимальной неоднородности поля l_{\min} в плоскости $z = 0$: $\Omega_{\max} \approx 2\pi/l_{\min}$. Откуда следует, что расстояние:

$$z \leq 0,2l_{\min}^2 / \lambda. \quad (26)$$

Неравенство (26) определяет область значений величины z , в которой справедливо приближение «тени» (25). Из выражения (26) видно, что верхняя граница

расстояния z зависит от размера минимальной неоднородности поля. Так, при $\lambda \leq 0,5 \cdot 10^{-6}$ м $l_{мин} = 10^{-4}$ м, получим $z \leq 4$ мм, а при той же длине волны и $l_{мин} = 10^{-3}$ м, соответственно получим $z \leq 400$ мм. Таким образом, рассмотрены виды приближений (три), нашедшие широкое применение в оптических информационных технологиях: Френеля, Фраунгофера и «тени» (табл. 1). Приближение Френеля, является в некоторой степени, общим из всех трех приближений, приближение «тени» получается из него при $z \rightarrow 0$.

Таблица 1. Математические описания амплитуды волны при различных приближениях

1.	$U(x, y, z) = -\frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d}{dx} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta, 0) \frac{e^{ik\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2+z^2}}}{\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2+z^2}} d\xi d\eta =$ $= \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega_1, \omega_2, 0) e^{iz\sqrt{k^2-\omega_1^2-\omega_2^2}} e^{i(\omega_1 x + \omega_2 y)} d\omega_1 d\omega_2,$ <p>где $G(\omega_1, \omega_2, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x, y, 0) e^{-i(\omega_1 x + \omega_2 y)} dx dy.$</p>	$0 \leq z \leq \infty$
2.	$U(x, y, z) = \frac{ke^{ikz}}{2\pi iz} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(\xi, \eta, 0) e^{ik\frac{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}{2z}} d\xi d\eta =$ $= \frac{e^{ikz}}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega_1, \omega_2, 0) e^{-ik\frac{\omega_1^2+\omega_2^2}{2k}} e^{i(\omega_1 x + \omega_2 y)} d\omega_1 d\omega_2$	$z \geq \sqrt[3]{\frac{(\sqrt{R^2 + \rho^2})^4}{\lambda}}$ $R = \sqrt{a^2 + b^2};$ $\rho = \sqrt{x^2 + y^2};$ $z \leq \frac{l^4}{\lambda^3};$ $l_{мин} \approx \frac{2\pi}{\Omega_{макс}};$ $\Omega = \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}$
3.	$U(x, y, z) = \frac{k}{2\pi iz} e^{ikz} G\left(\frac{kx}{z}, \frac{ky}{z}, 0\right)$ $U(x, y, z) = \frac{ke^{ikz}}{2\pi iz} e^{ik\frac{x^2+y^2}{2z}} G\left(\frac{kx}{z}, \frac{ky}{z}, 0\right)$	$\rho \leq 0,5\sqrt{\lambda z}$ $z \geq 5\frac{R^2}{\lambda}$
4.	$U(x, y, z) = e^{ikz} U(x, y, 0)$	$z \leq 0,2\frac{l_{мин}^2}{\lambda}$
<p>Примечание. 1. Точное приближение. 2. Приближение Френеля. 3. Приближение Фраунгофера. 4. Приближение тени</p>		

Рассмотрим эти приближения для гауссова пучка. Если поле в точке $z = 0$

определяется по закону $U(x, y, 0) = e^{-\frac{x^2+y^2}{a_0^2}}$, то воспользовавшись приближением

Френеля, получаем
$$U_{\text{Френ}}(x, y, z) = \frac{1}{1 + i \frac{2z}{ka_0^2}} e^{ikz} e^{-\frac{(x^2 + y^2)ik(2x + iha_0^2)}{4x^2 + k^2 a_0^2}}$$
. В приближении

Фраунгофера
$$U_{\text{Френ}}(x, y, z) = \frac{ka_0^2 e^{ikz}}{2iz} e^{-\frac{(x^2 + y^2)ik(2x + iha_0^2)}{4z^2}}$$
. Делая в приближении

Френеля, допущение вида $4z \geq k^2 a_0^2$, получим приближение Фраунгофера. Таким образом, приближение Фраунгофера справедливо при $z \gg z a_0^2 / \lambda$. В сантиметровом диапазоне при $\lambda = 1$ см и $a_0 = 1$ м расстояние z должно быть значительно больше 300 м, а в оптическом диапазоне, при $\lambda = 10^{-6}$ м расстояние z должно быть значительно больше 3 м при $a_0 = 10^{-3}$ м и 3 см при $a_0 = 10^{-4}$ м.

При рассмотрении огибающей гауссова пучка, т. е. линии, на которой интенсивность поля $|U(x, y, z)|$ в e раз меньше, чем на оси z , т.е. гиперболы вида $\rho^2 - [2z/(ka_0)]^2 = a_0^2$ с асимптотами $\rho = \pm 2z/(ka_0)$, в приближении же Фраунгофера ее роль исполняют две прямые линии, асимптоты гиперболы. Если в приближении

Френеля положить $2z \ll ka_0^2$, то получим приближение «тени»
$$U(x, y, z) = e^{ikz} e^{-\frac{x^2 + y^2}{a_0^2}}$$
. На сантиметровых волнах при $\lambda = 1$ см и $a_0 = 1$ м расстояние z должно быть значительно меньше 300 м, а в оптическом диапазоне при $\lambda = 10^{-6}$ м это расстояние должно быть значительно меньше 3 м при $a_0 = 10^{-3}$ м и 3 см при $a_0 = 10^{-4}$ м.

Выводы. Электромагнитное (ЭМ) поле между двумя параллельными плоскостями однородного пространства (слой пространства), при движении в нем ЭМ волн обладает свойствами инвариантности из чего следует возможность предположить существование математического описания его аналогично принятому в радиоэлектронике, т.е. существование радиоэлектронных аналогий в оптических информационных технологиях. Следуя радиоэлектронным аналогиям, пространство, заключенное между двумя параллельными плоскостями (слой пространства) ведет себя как четырехполюсник (в частности, фильтр) с коэффициентом передачи, определяемым формулой (20). Для нахождения поля в произвольной точке x, y, z по заданному его распределению в плоскости $z = 0$, необходимо, сначала, определить двумерную спектральную плотность заданного поля, потом, умножить ее на коэффициент передачи слоя пространства, определяемый выражением (20), и далее, от полученной функции реализовать ОПФ.

Физический смысл импульсной характеристики состоит в том, что она представляет собой поле точечного источника, моделью которого может служить маленькое прямоугольное отверстие в плоском экране с большой интенсивностью поля в отверстии. Поле точечного источника равно обратному преобразованию Фурье от коэффициента передачи, т. е. импульсной характеристике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов В. В. Основы створення пристроїв вводу, розуцілення й адресації потоків інформації для оптичних обчислювальних засобів : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.05 / В. В. Данилов ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – Київ, 2003. – 34 с.
2. Оптические информационные технологии. Обработка радиосигналов / И. А. Третьяков [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия А : Естественные науки. – 2016. – № 2. – С. 83-90.
3. Оптические информационные технологии. Преобразование радиосигналов / И. А. Третьяков [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия А : Естественные науки. – 2016. – № 3. – С. 40-49.
4. Оптические информационные технологии. Элементная база / В. В. Данилов [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия А : Естественные науки. – 2016. – № 4. – С. 72-79.
5. Данилов В. В. Оптические информационные технологии. Неуправляемые модуляторы / В. В. Данилов [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия А : Естественные науки. – 2017. – № 1. – С. 61-69.
6. Ярив А. Квантовая электроника : пер. с англ. / под ред. Я. И. Ханина. – 2-е изд. – Москва : Сов.радио, 1980. – 488 с.
7. Парыгин В. Н. Оптическая обработка информации / В. Н. Парыгин, В. И. Балакший. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1987. – 142 с.
8. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике : пер. с англ. / А. Папулис ; под ред. В. И. Алексеева. – Москва : Мир, 1971. – 495 с.
9. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники : в 2 т. Т. 2 / авт. : А. Ф. Богданов [и др.] ; под ред. Б. Х. Кривицкого. – Москва : Энергия, 1977. – 664 с.
10. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго ; пер. с франц. под ред. К. С. Шифрина. – Москва : Наука, 1965. – 772 с.

Поступила в редакцию 12.11.2018 г.

OPTICAL INFORMATION TECHNOLOGIES. IMPULSE CHARACTERISTIC

V.A. Gmyrya, V.V. Danilov

The structure of the field is investigated when electromagnetic waves of the optical range propagating information are transmitted through space bounded by two parallel planes. It is shown that a field at an arbitrary point in space is defined as a convolution of a field known in a mounted plane, with the impulse characteristic of a space layer. It is assumed that it is necessary to distinguish between approximations: shadows, Fresnel, Fraunhofer depending on the field structure in a given plane and the width of the space layer.

Keywords: space bounded by parallel planes (space layer), complex space transfer coefficient, amplitude-frequency and phase-frequency characteristics of space.

Гмыря Валерия Александровна

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

Gmyrya Valeria Aleksandrovna

engineer at Department of physics and information and communication technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

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

Danilov Vladimir

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

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

УДК 004.62

МЕТОДЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ

© 2018 И.А. Третьяков

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 две различные группы методов: параллельные и последовательные. Методы первой группы [1-3] предусматривают, что анализируемая экспериментальная кривая обрабатывается полностью. Методы второй группы, последовательные [4-6], предусматривают, что на данный момент анализируется только определенная часть экспериментальной кривой, на которой и необходимо выделить границы соответствующих участков. Существуют так же работы, в которых в некотором смысле объединены методы первой и второй группы. Так, в [7, 8] последовательным алгоритмом происходит первичное предварительное разделение экспериментальной кривой, которое в дальнейшем улучшается методами локальной оптимизации заданного параметра.

Постановка задачи. Методы сегментации экспериментальных кривых имеют преимущества и недостатки в сравнении друг с другом. Возникает необходимость анализа существующих методов сегментации, выявления в них недостатков и разработка решений для их устранения. Данная статья посвящена параллельным методам сегментации.

Сегментация параллельными методами. В методах параллельной сегментации для решения поставленной задачи вводится некоторый параметр оценки качества сегментации, зависящий от конкретного разделения кривой. Разделение, при котором данный параметр принимает экстремальное значение и является искомым. Такими параметрами могут являться: квадратичные невязки, минимаксные критерии, функции правдоподобия, статистики совпадения распределения, параметры деформации оси времени. Далее подробно рассмотрен каждый из вышеописанных параметров оценки качества сегментации.

Квадратичная невязка. Квадратичный параметр в непрерывной форме представляет собой:

$$J(T, a) = \sum_{j=1}^t \int_{T_{j-1}}^{T_j} [y(t) - F_j(t, a_j)]^2 dt, \quad (1)$$

где $a = (a_1, a_r)$, $\{F_j(t, a_j)\}$ - параметрически заданный класс функций. $F_j(t, a_j)$ принадлежит классу полиномов определенного порядка, а именно $F_j(t, a_j) = \sum_{k=0}^{m-1} a_k^j t^k$. Множество различных разделений конечно, так, как для экспериментальной кривой $f(t)$ задано конечное количество значений в дискретные моменты времени $t_l, l = 1 \dots n$. Значит найти минимальное значение параметра (1) возможно методом полного подбора. Коэффициенты a_j рассчитываются из условий минимума параметра, а именно из системы уравнений $\frac{\partial J}{\partial a_j^i}; i = 0 \dots m-1; j = i \dots r$. Таким образом, для каждого возможного

разделения T рассчитывается значение (1), значение которого будет минимальным при самом оптимальном разделении. Недостатком метода полного перебора являются временные затраты, которые предлагается существенно сократить, используя рекуррентные выражения динамического программирования, а именно:

$$f_0(t_Q) = \min_{t_1 \leq T_1 \leq t_Q} \left\{ \int_{T_0}^{T_1} [f(t) - F_1(t_1 \hat{a}_1)]^2 dt + \int_{T_0}^{T_1} [f(t) - F_2(t_1 \hat{a}_2)]^2 dt \right\}, Q = 1 \dots n.$$

Для $N = 2, 3, \dots, r-1$:

$$f_N(t_Q) = \min_{t_1 \leq T_N \leq t_Q} \left\{ f_{r-1}(T_N) + \int_{T_N}^{t_Q} [f(t) - F_{N+1}(t_1 \hat{a}_{N+1})]^2 dt \right\}, Q = 1 \dots n; \tag{2}$$

$$\min_{T, a} J(T, a) = f_{r-1}(t_N),$$

где \hat{a} - оценки коэффициентов, рассчитываемые на соответствующем интервале. На последнем цикле алгоритма (2) находится оптимальное значение T_{r-1}^* границы T_{r-1} . Для нахождения оптимальных границ интервалов задаётся $n = T_{r-1}^*$, $r \rightarrow r-1$ и повторяются шаги (2) заново. Например, для нахождения оптимального значения T_{r-2}^* границы T_{r-2} задаётся $n = T_{r-2}^*$, $r = r-1$. Следовательно, за $r-1$ повторений шагов алгоритма, определяются все оптимальные значения границ интервалов. Для определения количества интервалов, в случае если оно не задано предварительно, задается величина ошибки J^0 , и r находится с помощью соотношения $f_{r-1}(t_n) \leq J^0$.

Минимаксные параметры. Минимаксный параметр для оценки качества аппроксимации представляет собой:

$$\tilde{J}(T, a) = \max \{e_j(T_{j-1}, T_j): j = 1 \dots r\}, \tag{3}$$

где $e_j(T_{j-1}, T_j) = \min_{a_j} \max_{T_{j-1} \leq t \leq T_j} |f(t) - F_j(t, a_j)|$. Для минимизации (3) применяются рекуррентные выражения метода динамического программирования:

$$f_1(t_Q) = \min_{T_0 \leq T_1 \leq t_Q} \max \{e(T_0, T_1), e(T_1, t_Q)\}, Q = 1 \dots n.$$

Для $N = 2, 3, \dots, r-1$:

$$f_N(t_Q) = \min_{T_0 \leq T_N \leq t_Q} \max \{F_{N-1}(T_N), e(T_N, t_Q)\}, Q = 1 \dots n.$$

Аппроксимация определяется достаточными условиями минимума параметра (3), а именно:

$$e_1(T_0, T_1) = e_2(T_1, T_2) = \dots = e_r(T_{r-1}, T_r), \quad (4)$$

Для удовлетворения условий (4) при построении аппроксимации предлагается использовать:

$$e_j^k(T_{j-1}^k, T_j^k) = C_j^k (S_j^k)^m, \quad j = 1 \dots r, \quad (5)$$

где $S_j^k = T_j^k - T_{j-1}^k$ - длина интервала на k -м шаге алгоритма, C_j^k - неизвестные коэффициенты, m - размерность полинома $F_j(t, a_j)$. Иными словами строится предположение, что ошибки аппроксимации $e_j^k(T_{j-1}^k, T_j^k)$, $j = 1 \dots r$ пропорциональны длинам соответствующих интервалов в степени m . Рекуррентные выражения данного алгоритма выглядят следующим образом:

$$S_j^{k+1} = \sqrt[m]{E / C_j^k}, \quad (6)$$

где C_j^k , $j = 1 \dots r$ находятся из (5), а $E = \left[\frac{(T_r - T_0)}{\sum_{j=1}^r \left(1 / \sqrt[m]{C_j^k} \right)} \right]^m$ - условие постоянства суммы

длин интервалов. Имеет место алгоритм схожий с (6), а именно:

$$T_j^{k+1} = T_j^k + C_j^k (e_{j+1}^k - e_j^k). \quad (7)$$

В описанных алгоритме в случае нулевой ошибки на интервале $C_j^k = 0$ вычислить S_j^k не получается. Этот недостаток предлагается устранить исключением интервалов с нулевой ошибкой из анализа, после чего происходит обработка остальных участков экспериментальных кривых.

Параметр минимума квадратичной невязки для выделения информативных участков. Информативными или аномальными участками области определения исследуемой экспериментальной кривой являются участки (сложные), характер поведения данной кривой на которых оказывается резко другим по сравнению с характером ее поведения на остальных участках (простые) области определения. Далее данный метод основывается на предположении о том, что для экспериментальной кривой, анализируемой в области простых участков, определен закон характера ее поведения. Необходимо найти подмножество w^* сложных участков и значения параметров описания экспериментальной кривой на простых участках, для которых выбранный параметр оценки качества аппроксимации принимает экстремальное значение. Для анализа таким образом детерминированных процессов рекомендуется применять квадратичную невязку как оценка качества аппроксимации:

$$J(w) = \sum_{t \in \frac{T}{w}} S_t^2(w), \quad S_t(w) = f_t - \sum_{i=1}^m \hat{c}_i(w) \varphi_i^i, \quad (8)$$

где $T = (1, 2, \dots, N)$ - область определения исследуемой кривой f , w – подмножество сложных участков с неизвестной длиной d , $\hat{c}_i(w)$ - коэффициенты многочлена наилучшего приближения кривой f по системе N -мерных векторов $\{\varphi_i^i, i = 1 \dots m; t = 1 \dots N\}$ на множестве отсчетов $\frac{T}{w}$, $S_t(w)$ - невязка приближения.

Отыскиваемое подмножество w^* рекомендуется определять из необходимых условий минимума параметра (8): $\min_{t \in w} S_t^2(w) \geq \max_{t \in \frac{T}{w}} s_t^2(w)$.

Функция правдоподобия. Случайный процесс $F(t)$, $t = 1 \dots N$ является последовательностью независимых случайных величин. Распределение у данной последовательности до момента времени T_1 представляет собой $R(F, \theta_1)$, а начиная с этого момента времени T_1 - $Q(F, \theta_2)$. Вектора параметров θ_1, θ_2 неизвестны. Для оценки качества обнаружения разладки T_1 по реализации $f(t) = (f_1, \dots, f_N)$ используется логарифмическая функция правдоподобия:

$$J(T_1, \theta_1, \theta_2) = \sum_{j=1}^{T_1} \log x(y_j, \theta_1) + \sum_{j=T_1+1}^{T_2} \log y(y_j, \theta_2), \quad (9)$$

где $T_2 = N$, а x, y – функции плотности вероятности до момента времени T_1 и после. Отыскиваемым моментом разладки является T_1^* , доставляющее максимальное значение параметру (9), для поиска которого применим метод полного перебора. В случае, когда θ_1, θ_2 определены, в момент времени T_1 вид распределения не меняется и вместо (9)

предлагается использовать кумулятивную сумму $J'(T_1) = \sum_{j=1}^{T_1} V_j$, в которой

$V_j = \log x(y_j, \theta_1) + \log x(y_j, \theta_2)$. В случае, когда x – функция плотности нормального распределения и изменяется только среднее значение, то V_j не зависит от T_1 и его

следует определять как $V_j = y_j - \frac{(\theta_1 + \theta_2)}{2}$, где θ_1, θ_2 - средние значения до и после

разладки. В случае биномиального распределения $V_j = y_j \log \frac{\theta_1}{\theta_2} - (-y_j) \log \frac{(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)}$, где

θ_1, θ_2 - значение вероятностей $F(t_j) = 1$ при $t_j \in [1, T_1]$ и $t_j \in [T_1, N_1]$.

Статистики совпадения распределения. Для обнаружения разладок случайных процессов $F(t)$ данный метод, в отличие от вышеописанного метода на основе функции правдоподобия, не требует задания функций распределения случайных величин $F(t), t = 1 \dots N$ до и после момента разладки. Необходимо, чтобы данные функции до момента разладки и после были отличимы, а для оценки качества обнаружения применяются двухвыборочные статистики. Применяют статистики Чернова-Сэвиджа, Манна-Уитни, статистику Колмогорова-Смирнова и т.д. Отыскиваемым моментом

разладки является момент времени T_1^* , доставляющий экстремум выбранному параметру. Для полученной таким способом оценки $\lim_{N \rightarrow \infty} P\{|T_1^* - T_1| > \varepsilon\} = 0$, где T_1 - истинный момент разладки, т.е. оценка T_1^* состоятельна.

Параметры деформации оси времени. Данные параметры рассмотрим на примере сегментации экспериментальных кривых акустических колебаний [9]. Перед сегментацией таких кривых, например, осциллограмм человеческой речи, необходимо произвести построение эталонных объектов, из которых состоит речь. Применение эталонных объектов приводит задачу анализа кривой акустического сигнала к задаче построения наиболее близкого к данной кривой эталона, определяющего отыскиваемую сегментацию. Для определения «близости» двух наборов векторов используется параметр J , оптимизация которого приводит к нахождению отыскиваемой сегментации анализируемой экспериментальной кривой. Для анализа отдельных акустических элементов, например, слов, в параметр представляет собой:

$$J_1(i(x), j(x); F_n, A_m) = \frac{1}{\sum_{k=1}^K w(k)} \sum_{k=1}^K d(i(k), j(k)), \quad (10)$$

где k – вспомогательная ось, $w(k)$ - заданная весовая функция, $i(k), j(k)$ - заданные неубывающие функции, задающие числу k целое число, не превышающие n и m соответственно, $d(i(k), j(k))$ - евклидово расстояние между векторами $a_{j(k)}, b_{i(k)}$. Минимизацию параметра (10) рекомендуется осуществлять с помощью метода динамического программирования, рекуррентные выражения которого имеют вид:

$$g_1(i(1), j(1)) = d(i(1), j(1))w(1), \quad (11)$$

$$g_k = \min_{\{[i(k-1), j(k-1)]\}} \{g_{k-1}(i(k-1), j(k-1)) + d(i(k), j(k))w(k)\}, k = 2, 3, \dots, K,$$

где $\{[i(k-1), j(k-1)]\}$ - множество пар $[i, j]$, для которых $i(k) - i(k-1)$ и $j(k) - j(k-1)$ удовлетворяют заданным ограничениям. Для анализа нескольких акустических элементов, например, фраз, набор эталонов строится с помощью произвольной конкатенации эталонных наборов отдельных элементов из заданного словаря эталонов. А именно, $A_m = (A^{q(1)} \oplus A^{q(2)} \oplus \dots \oplus A^{q(x)} \oplus A^{q(r)})$, где $A^q = (a_1^q, \dots, a_{m_q}^q)$ - эталонный набор q -го элемента, r – неизвестное количество элементов, $q(x) \in [1, L]$, L – число элементов в словаре, $m = \sum_{x=1}^L m_{q(x)}$. Для определения близости применяется выражение:

$$J_2(r, q(x)) = \min_{i, j} J_1(i(x), j(x); F_n, A_m), \quad (12)$$

где J_1 параметр оценки близости отдельных акустических элементов (10). Минимизацию параметра (12) рекомендуется осуществлять методом динамического программирования, рекуррентные выражения которого аналогичны (11).

Выводы. Рассмотренные в данной работе методы имеют как преимущества, так и недостатки. Общим недостатком трёх вышеописанных алгоритмов (5-7) является то, что не всегда существует решение, удовлетворяющее условиям (4) при дискретном задании экспериментальной кривой. Данный недостаток предлагается устранить исключением интервалов с нулевой ошибкой из анализа, после чего происходит обработка остальных участков экспериментальных кривых.

Недостатком метода полного перебора являются временные затраты, которые предлагается существенно сократить, используя рекуррентные выражения динамического программирования. Также методом динамического программирования рекомендуется осуществлять минимизацию параметров (10-12).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов Е. А. Об эффективности метода последовательной сегментации толстых и тонких кровеносных сосудов глазного дна / Е. А. Федотов, Д. А. Черноморец, В. М. Михелев // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия : Экономика. Информатика. – 2018. – № 2. – С. 312-321.
2. Никифоров И. В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов / И. В. Никифоров. – Москва : Наука, 1983. – 199 с.
3. Вишнякова О. А. Автоматическая сегментация речевого сигнала на базе дискретного вейвлет-преобразования / О. А. Вишнякова, Д. Н. Лавров // Математические структуры и моделирование. – 2011. – № 2 (23). – С. 43-48.
4. Каримов А. Р. Параллельная реализация методов сегментации по морфологическим водоразделам / А. Р. Каримов, М. А. Верхотуров // Вестник УГАТУ. – 2014. – № 2 (63). – С. 172-180.
5. Медведева Е. В. Метод сегментации изображений в прикладных телевизионных системах / Е. В. Медведева, Е. Е. Курбатова // Т-Comm. – 2010. – № 2. – С. 46-49.
6. Стругайло В. В. Обзор методов фильтрации и сегментации цифровых изображений / В. В. Стругайло // Машиностроение и компьютерные технологии. – 2012. – № 05. – С. 270-281.
7. Pavlidis T. Linguistic Analysis of Waveforms / T. Pavlidis // Software Engineering / J. T. Tou (Ed.). – New York, 1971. – Vol. 2. – P. 203-225.
8. Браверман Э. М. Структурные методы обработки эмпирических данных / Э. М. Бравеман, И. Б. Мучник. – Москва : Наука, 1983. – 464 с.
9. Исследование применимости функций сложности к задачам идентификации переходных участков экспериментальных кривых акустических колебаний / И. А. Третьяков [и др.] // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. – 2018. – №5 (11). – С. 332-335.

Поступила в редакцию 02.11.2018 г.

METHODS OF PARALLEL SEGMENTATION EXPERIMENTAL CURVES

I. Tretiakov

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

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

Tretiakov Igor

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

УДК 003.26.09

АНАЛИЗ ШИФРОВ С НАЛИЧИЕМ S-БЛОКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

© 2018 *М.В. Бабичева, Б.С. Савченко*

Наряду с линейным, дифференциальный криптоанализ является самым распространенным при атаках на блочные шифры. Этим методом был взломан шифр DES. Подобной атаке подвержены шифры с постоянным S-блоком. Данный метод работает с парами шифротекстов, для которых известно различие соответствующих открытых текстов, и рассматривает изменение этих различий в процессе шифрования. В работе изучены уязвимости блочных шифров, которые широко применяются в настоящее время для закрытия информации в инфокоммуникационных системах. Смоделирована задача нахождения секретного ключа при наличии «черного ящика», генерирующего шифротексты по неизвестному алгоритму. Предложена методика определения наличия нелинейности в алгоритме шифрования. Проанализирован метод дифференциального криптоанализа для нелинейных S-блоков. Разработана программа на языке Python 3.6, позволяющая установить ключ шифрования, посредством дифференциального криптоанализа S-блока 3x2 и подробно продемонстрировать пошаговое выполнение алгоритма. Данное приложение может быть полезно не только для студентов, изучающих криптографию и криптоанализ, но и криптоаналитикам анализирующим уязвимости того или иного блочного шифра.

Ключевые слова: криптография, дифференциальный криптоанализ, блочные шифры, S-блок.

Введение. Современные методы шифрования являются достаточно криптостойкими ко взлому. Это касается, в частности, таких шифров, как AES, «Магна», «Кузнечик». Однако и у них имеются уязвимости. Знание структуры и принципа работы шифра может послужить базой, для успешной атаки на него. При этом секретность большинства современных шифров может быть обеспечена за счет ключа шифрования, так как алгоритм шифрования рано или поздно может стать известным противнику, или является стандартным и публикуется в открытых источниках. Уязвимостью широкой группы современных блочных шифров всё ещё является уязвимость к дифференциальному криптоанализу [1-3]. Целью аналитика, применяющего дифференциальный криптоанализ, является получение некоторой информации о ключе, которая может как полностью скомпрометировать ключ, так и просто дать некоторое преимущество при прямом подборе ключа. Общую идею условного дифференциального криптоанализа необходимо каждый раз дорабатывать и приспосабливать отдельно для каждого криптографического примитива, поэтому несмотря на большое количество исследований в этой области, применение дифференциального криптоанализа для конкретного нелинейного блока шифрования является актуальной задачей.

Постановка задачи. Предположим, что у криптоаналитика имеется некоторое перехваченное важное зашифрованное сообщение и приложение для шифрования, в котором соответствующий открытый текст был зашифрован. При помощи приложения можно вводить открытый текст любой длины и получать соответствующий шифротекст.

Однако применяемый алгоритм шифрования неизвестен и приложение представляет из себя классический «черный ящик». Считаем, что взлом программы методом реверс-инжиниринга невозможен и она не имеет бинарных уязвимостей. Необходимо найти секретный ключ, который применяется для шифрования или по

крайней мере несколько его бит. Интерфейс приложения для шифрования представлен на рисунке 1.

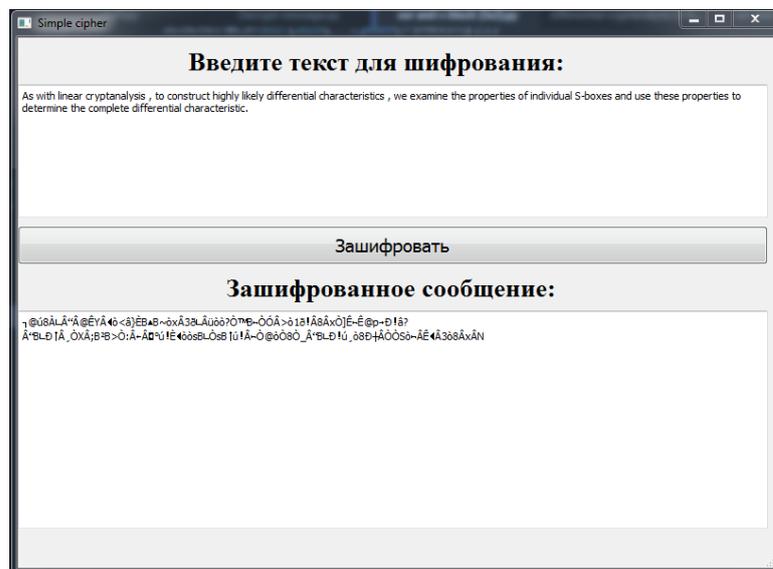


Рис. 1. Общий вид рабочего окна приложения для шифрования

Целью данной работы является решение задачи нахождения секретного ключа для некоего нелинейного блочного шифра, представленном в виде «черного ящика», который может генерировать пары открытый – зашифрованный текст методом дифференциального криптоанализа. Для наглядности и сокращения громоздких вычислений выбран S-блок 3x2, однако представленный алгоритм справедлив и для больших нелинейных блоков, которые широко применяются в современных блочных шифрах, таких как AES и ГОСТ 28147-89 [4,5].

Суть дифференциального криптоанализа. В процессе шифрования различных текстовых блоков можно заметить, что длина текста на выходе программы не совпадает с длиной сообщения на входе, а также, что при вводе одинаковых слов зашифрованное сообщение не меняется (как показано на рис. 2).

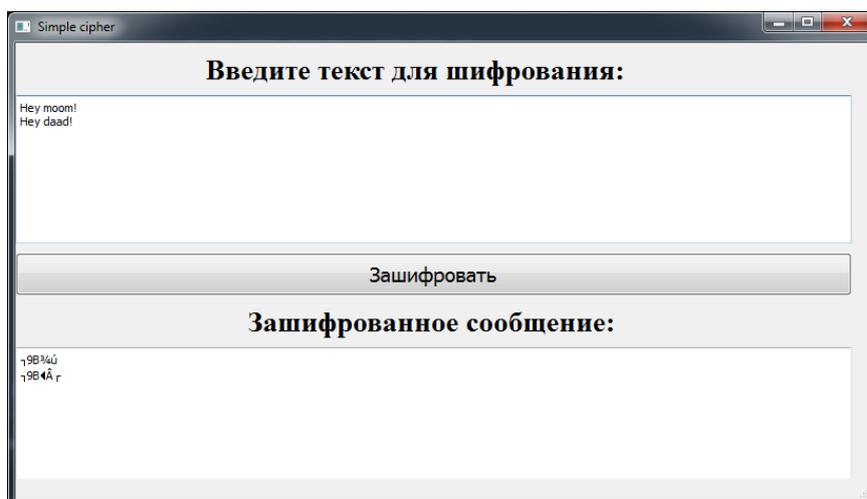


Рис. 2. Исследование свойств шифра

Проанализировав результаты можно прийти к выводу, что 9 символов на входе преобразовываются в 6. Справедливо предположить, что каждые 3 символа открытого текста преобразуются в 2 символа зашифрованного текста, то есть в шифре присутствует некая нелинейность (рисунок 3).

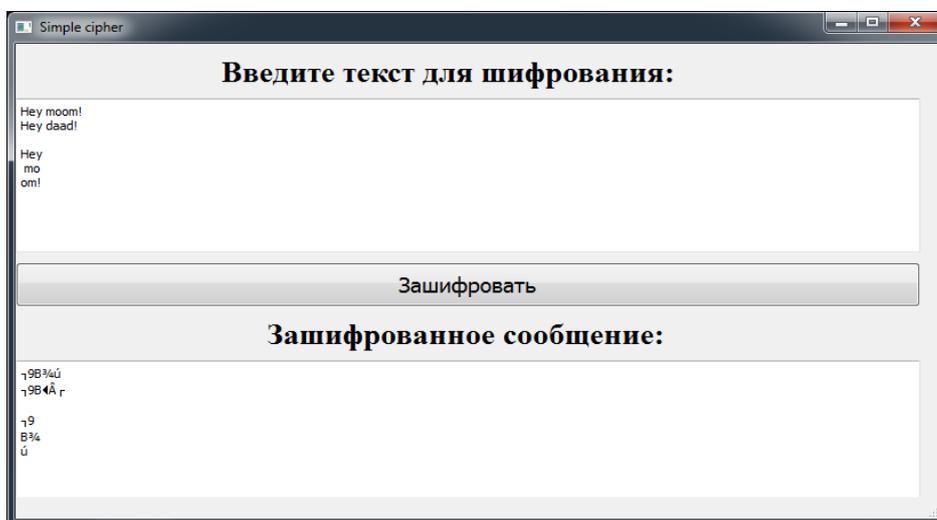


Рис. 3. Обнаружение нелинейного элемента – S-блока

Можно сделать вывод, что это блочный шифр, который в процессе шифрования сокращает длину сообщения на одну треть. Такое преобразование в блочных шифрах выполняет S-блок [6]. Очевидно, что его размерность равна 3×2 , и что каждым 3 битами на входе в S-блок сопоставляются 2 бита на выходе. Подобных S-блоков может быть 32 и нужный легко подбирается прямым перебором. Алгоритм дифференциального анализа основан на исследовании преобразования разностей открытых текстов и, соответствующих им, зашифрованных текстов и является статистическим методом [7]. Разностью (дифференциалом), как правило, является операция исключяющего “ИЛИ”. Целью дифференциального криптоанализа может быть либо полное, либо частичное, вскрытие ключа шифрования.

Обозначим пару открытых текстов как P_1 и P_2 , а пару зашифрованных текстов C_1 и C_2 , сообщение на входе в S-блок – X_1 и X_2 – соответственно. После анализа большого количества открытых и зашифрованных сообщений можно сделать вывод о структуре нелинейного S-блока. Сформируем таблицу соответствий. Для S-блока применяемого в данном приложении она будет выглядеть как на рисунке 4.

X	000	001	010	011	100	101	110	111
C	11	00	10	10	01	00	11	00

Рис. 4. Таблица S-блока

Теперь нужно установить вероятностные отношения между дифференциалами открытых текстов и соответствующим им дифференциалам зашифрованного текста. В отсутствие нелинейности данные дифференциалы будут всегда равны. Для этого проводится операцию исключяющего “ИЛИ” каждого элемента в строке X попарно с другими элементами этой строки, аналогично в строке C. Результаты сопоставляются с соответствующим значением на выходе и входе в S-блок. Формируется дифференциальная таблица для входов и выходов шифра, которая и используется для

дальнейшего анализа. Сумма всех значений в этой таблице должна равняться 64 – количеству возможных сочетаний для «XOR» значений X и C в таблице S-блока. В дифференциальном криптоанализе гораздо удобнее иметь дело с вероятностями. Для нахождения вероятностей, с которыми будут выпадать соответствующие сочетания дифференциалов входной и зашифрованной бинарной последовательности количество вариантов в строке просто делится на 8. Получаются значения вероятности от 1 до 0,25. Вероятности распределяются неоднородно из-за нелинейности структуры S-блока. Дифференциальная таблица в двух видах – количественном и вероятностном представлена на рисунке 5.

		$C_1 \oplus C_2$			
		00	01	10	11
$P_1 \oplus P_2$	000	8			
	001	2	2		4
	010	2	2	4	
	011		4	2	2
	100	2	2	4	
	101		4	2	2
	110	4		2	2
	111			2	6

		00	01	10	11
000	1	0	0	0	
001	0,25	0,25	0	0,50	
010	0,25	0,25	0,50	0	
011	0	0,50	0,25	0,25	
100	0,25	0,25	0,50	0	
101	0	0,50	0,25	0,25	
110	0,50	0	0,25	0,25	
111	0	0	0,25	0,75	

Рис. 5. Дифференциальная таблица для входов и выходов для шифра (слева-количественная таблица, справа-вероятностная таблица)

Таблица показывает, что если входная разность равна 010, то разность на выходе равна 10 с вероятностью 0.5 (50%). Исходя из полученной таблицы, можно подобрать открытые тексты, которые будут иметь самую высокую вероятность [8].

Рассматривая таблицу, и зная, что, если $P_1 \wedge P_2 = 001$, $C_1 \wedge C_2 = 11$ с вероятностью 50%. То по значению C_1 и C_2 , можно установить по таблице S-блока значение X_1 и X_2 .

Для $C_1=00$, $X_1=001$ это будет либо $X_1=101$ либо $X_1=111$. При этом, знаем значение дифференциала для открытого текста $P_1=010$. Формула для нахождения ключа имеет вид:

$$K_n = X_n \wedge P_n,$$

где n-порядковый номер анализируемой пары. Тогда:

$$K_1 = 001 \wedge 010 = 011$$

$$K_1 = 101 \wedge 010 = 111$$

$$K_1 = 111 \wedge 010 = 101$$

Заметим, что в результате анализа первой пары открытого и закрытого текста, у всех трёх подобранных ключей на 3 бите стоит единица. Это и будет наиболее вероятным значением третьего бита ключа.

Перейдем к анализу второй пары открытого и зашифрованного текста:

Для $C_2=11$, $X_2=000$ либо $X_2=110$. При этом, мы знаем значение $P_2=011$.

$$K_2 = 000 \wedge 011 = 011$$

$$K_2 = 110 \wedge 011 = 101$$

В результате анализа второй пары открытого и закрытого текста, у всех трёх подобранных ключей на 3 бите также стоит единица, что позволяет утверждать, что это справедливо и для реального ключа.

Анализируя последующие пары можно установить другие биты, входящие в ключ. Для блока 3x2 возможно найти все 3 бита ключа. Однако ключ может содержать и большее количество битов, да и S-блоки современных шифров обычно имеют большую размерность. В этом случае после нахождения достаточного количества битов в ключе, можно использовать атаку brute force, чтобы найти весь ключ. Применение дифференциального криптоанализа позволяет сократить количество перебираемых значений, следовательно, и время атаки.

Реализация компьютерного приложения. Для реализации изложенного выше алгоритма поиска секретного ключа методом дифференциального криптоанализа в компьютерном приложении был использован язык программирования Python 3.6 [9]. Написана программа с удобным пользовательским интерфейсом, представленном на рисунке 6, и пошаговой демонстрацией вычислений. На рисунке показан результат работы программы для изложенного в статье примера.

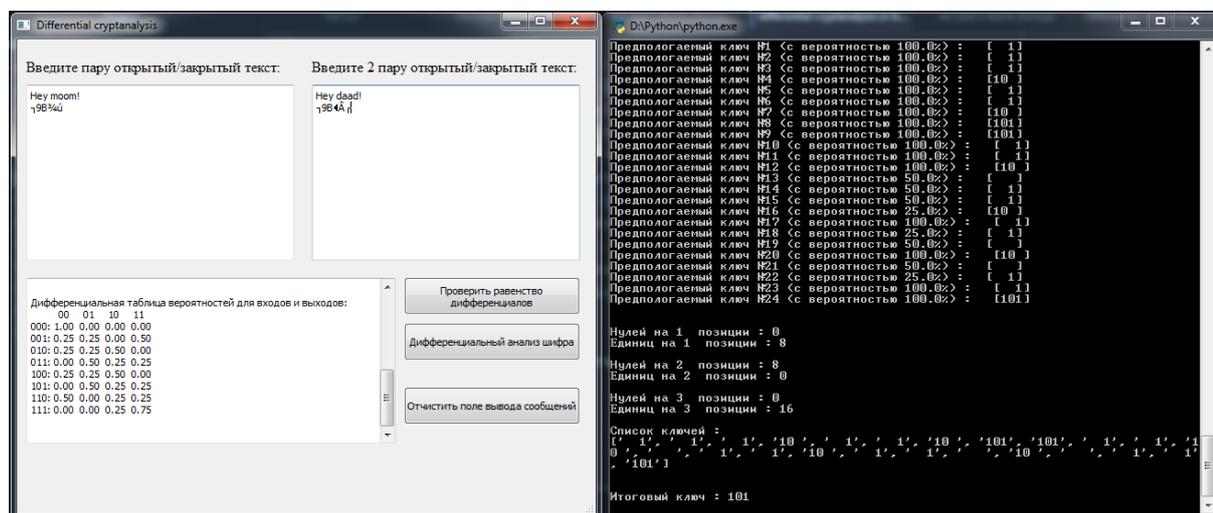


Рис. 6. Интерфейс программы дифференциального криптоанализа блочного шифра

В 2 окна вводятся пары открытых и зашифрованных текстов одинаковой длины. Кнопка «Проверить равенство дифференциалов» позволяет продемонстрировать неочевидный факт, что у двух открытых и зашифрованных секретным ключом текстов дифференциалы равны. Здесь же выводится предполагаемая дифференциальная таблица вероятностей для введенных шифротекстов. В правом окне пошагово выведены результаты вычислений, предполагаемые ключи, подобранные алгоритмом с соответствующей вероятностью. Затем, основываясь на полученной статистике, вычисляется итоговый ключ. Таким образом, анализируя неоднородности дифференциальных распределений в S-блоке и имея адаптивно подобранные пары открытых и, соответствующих им, зашифрованных текстов можно установить ключ шифрования.

Выводы. В ходе анализа особенностей некоторого шифра были выявлены его уязвимости, которые позволяют воспользоваться методом дифференциального криптоанализа. Применяя этот метод можно установить характер нелинейности S-блока шифра, составить дифференциальную таблицу для входов и выходов шифра, на основе которой впоследствии провести атаку поиска секретного ключа. Реализована программа на языке программирования Python 3.6, позволяющая на основе сгенерированных 2 пар открытых и закрытых текстов определять ключ шифрования, с пошаговой демонстрацией этого процесса. Данная программа внедрена в качестве учебного пособия по курсу “Криптография”, для демонстрации принципа и метода дифференциального криптоанализа, расширения и закрепления знаний студентов в предметной области на кафедре «Радиофизики и инфокоммуникационных технологий» Донецкого национального университета. Подобная методика может быть предложена криптоаналитикам спецслужб для расшифровки важных перехваченных сообщений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабенко Л. К. Современные алгоритмы блочного шифрования и методы их анализа / Л. К. Бабенко, Е. А. Ищукова. – Москва : Гелиос АРВ, 2006. – 376 с.
2. Бабенко Л. К. Анализ современных криптографических систем с помощью метода дифференциального криптоанализа / Л. К. Бабенко, Е. А. Ищукова // Актуальные аспекты защиты информации в Южном федеральном университете : монография. – Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 102-181.
3. Маро Е. А. Алгебраический анализ стойкости криптографических систем защиты информации / Е. А. Маро // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. – С. 67-79.
4. Babenko L. K. Research about Strength of GOST 28147-89 Encryption Algorithm / L. K. Babenko, E. A. Ishchukova, E. A. Maro // Proceedings of the 5th international conference on Security of information and networks (SIN 2012), ACM. – New York, 2012. – P. 80-84.
5. Babenko L. GOST Encryption Algorithm and Approaches to its Analysis / L. Babenko, E. Ischukova, E. Maro // Theory and Practice of Cryptography Solutions for Secure Information Systems, IGI Global book series Advances in Information Security, Privacy, and Ethics (AISPE) Book Series, Published in the United States of America by Information Science Reference. – Hershe, 2013. – P. 34-61.
6. Nyberg K. Perfect nonlinear S-boxes. Advances in Cryptology / K. Nyberg // EUROCRYPT '91 : proceedings of the 10th annual international conference on Theory and application of cryptographic techniques, Brighton, UK, April 08-11, 1991. – Berlin, 1991. – P. 378-386.
7. Biham E. Differential Cryptanalysis of DES-like Cryptosystems (Extended Abstract) / E. Biham, A. Shamir // Advances in Cryptology – Crypto'90 : Conference proceedings. – 1991. – P. 2-21.
8. Courtois N. Cryptanalysis of block ciphers with overdefined systems of equations / N. Courtois, J. Pieprzyk // ASIACRYPT. – 2002. – P. 267-287.
9. Sweigart A. Hacking Secret Ciphers with Python / A. Sweigart. – Independent Publishing Platform, 2013. – P. 153-216.

Поступила в редакцию 16.11.2018 г.

CIPHERS WITH S-BLOCK ANALYSIS BY DIFFERENTIAL METHOD

M. Babicheva, B. Savchenko

Along with linear, differential cryptanalysis is the most common when attacking block ciphers. This method cracked the DES cipher. Ciphers with permanent S-blocks are subject for such attacks. This method deals with pairs of ciphertexts when the distinction of the corresponding plaintexts is known, and considers the change of these differences in the encryption process. The paper studies the vulnerabilities of block ciphers, currently widely used to protect information in info communication systems. The process of searching a secret key for a “black box” that generates ciphertexts using an unknown algorithm is modeled. A method for

determining the presence of nonlinearity in the encryption algorithm is proposed. The differential cryptanalysis method for nonlinear S-blocks is analyzed. A Python 3.6 program that allows you to set an encryption key using differential cryptanalysis of the S-block 3x2 and demonstrate in detail the step-by-step execution of the algorithm developed. This application can be useful not only for students studying cryptography and cryptoanalysis, but also for cryptanalysts analyzing the vulnerabilities of a particular block cipher.

Keywords: cryptography, differential cryptanalysis, block ciphers, S-block.

Бабичева Маргарита Вадимовна

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

Babicheva Margarita

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

Савченко Богдан Сергеевич

студент кафедры радиоп физики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: bogdansavchenko28@gmail.com

Savchenko Bohdan

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

УДК 004.62

МОДЕЛЬ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА СПЕКТРАЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ-РАЗУПЛОТНЕНИЯ ПОТОКОВ ДАННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

© 2018 *А.В. Шалаев, В.В. Данилов*

В настоящей работе предложено математическое описание и модель акустооптического элемента спектрального уплотнения - разуплотнения потоков данных автоматизированных информационно-коммуникационных систем на основе акустооптического взаимодействия. Рассчитано быстроедействие коллинеарной акустооптической ячейки.

Ключевые слова: акустооптическое взаимодействие; уплотнение-разуплотнение; волоконный световод; аппаратная функция.

Введение. Важнейшей характеристикой автоматизированной информационно-коммуникационной системы является ее пропускная способность. Такие системы на основе волоконно-оптических линий передачи [1] обладают наибольшей пропускной способностью. Однако дисперсионные свойства волоконного световода затрудняют реализацию соответствующих каналов связи в информационно-коммуникационных системах без уплотнения - разуплотнения потоков данных [2]. Благодаря спектральному уплотнению в оптическом диапазоне появляется возможность использования всей оптической полосы пропускания волоконных световодов. В ряде случаев спектральное уплотнение является предпочтительнее по сравнению с другими видами, а именно в системах связи, при реализации тракта на волоконных световодах с допустимой скоростью передачи 10 Гбит/с, на одной оптической несущей [3,4]. Алгоритм расчета акустооптического устройства для ввода данных в оптоэлектронные системы, технология реализации акустооптических устройств и принцип преобразования радиосигналов в их лазерные аналоги при акустооптическом взаимодействии представлены в [5-7].

Постановка задачи. Современная электронная коммутационная техника с трудом обрабатывает импульсы не короче 1 нс, а имеющиеся электронные терминалы работают на скорости передачи не более 1 Гбит/с. При скорости 10 Гбит/с, требуется дорогостоящая разработка электронных средств уплотнения и разуплотнения, причем проблемы возникают на стадии подбора соответствующей полупроводниковой элементной базы. Несмотря на широкое распространение волоконных световодов со ступенчатым профилем показателя преломления, параметр широкополосности у них крайне мал. Поэтому при использовании одной оптической несущей никакой из известных радиоэлектронных принципов уплотнения не поможет передать по такому волоконному световоду большой поток информации [4]. Учитывая вышесказанное, возникает необходимость предложить математическое описание и модель акустооптического элемента спектрального уплотнения - разуплотнения потоков данных на основе коллинеарного акустооптического взаимодействия, в частности, его физической модели - коллинеарной акустооптической ячейки.

Математическое описание. В оптической спектроскопии, спектральные линии считаются разрешенными, если удовлетворяется критерий Рэлея. В информационно-коммуникационных системах этого недостаточно, для этого необходимо:

- при разделении линий (см. рис. 1), необходимо максимально получить энергию от каждой из них (заштриховано на рис. 1), поскольку для высокопрозрачных современных ВСв каждый децибел потерянной мощности эквивалентен уменьшению длины линии связи [8];

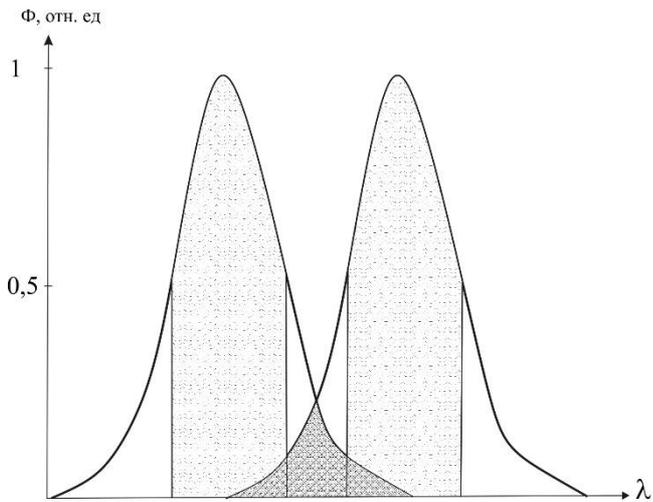


Рис. 1. Спектральное распределение мощности двух оптических несущих

- доля энергии от соседней линии (область двойной штриховки, рис. 1) должна быть очень малой, что определяет низкий уровень перекрестных помех между каналами;
- желателен минимальный частотный интервал между оптическими несущими для более полного использования полосы пропускания волоконного световода;
- в специальных информационно-коммуникационных системах необходима аппаратура обладающая малыми массогабаритами и энергозатратами.

В оптической спектроскопии для разделения линий применяют монохроматоры, имеющие большие габариты, что обусловлено стремлением к высокому спектральному разрешению. В оптической связи интервалы между несущими составляют не менее 10 нм [3, 8], а малогабаритные делители каналов могут быть выполнены по аналогии с применяемыми в спектроскопии. Ближе всего делители каналов стоят к полихроматорам – спектральным приборам для одновременной селекции и регистрации многих линий. Уровень выходного сигнала фотоприемников пропорционален принимаемой мощности оптического сигнала. Поэтому при заданном максимальном уровне перекрестных помех по электрической мощности, порядка 40 дБ, достаточно снизить перекрестные помехи по мощности оптического сигнала в делителе каналов до 20 дБ.

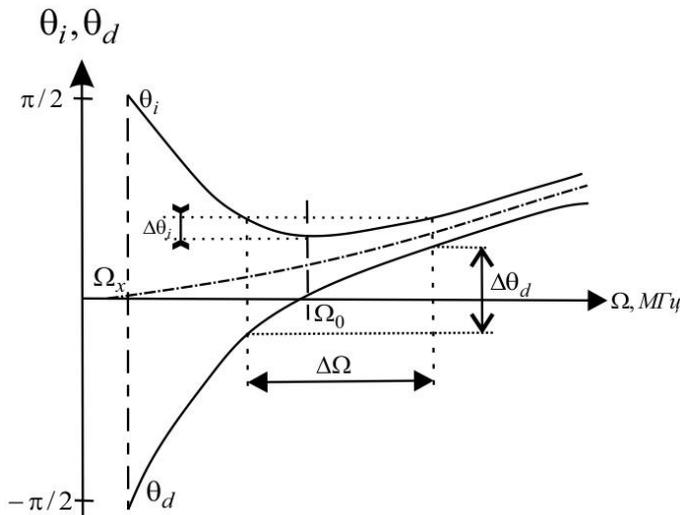
Основываясь на физике акустооптического взаимодействия селекции оптических сигналов [9, 10], можно утверждать, что световые волны разной поляризации имеют разные фазовые скорости. Поэтому, когда при дифракции происходит поворот плоскости поляризации световой волны, характер дифракции существенно меняется. При анизотропной дифракции Брэгга, угол падения света определяется выражением:

$$\sin \Theta_i = \frac{\lambda_0}{2n_i \Lambda} \left[1 + \left(\frac{\Lambda}{\lambda_0} \right)^2 (n_i^2 - n_d^2) \right] = \frac{\lambda_0 \Omega}{2n_i V} \left[1 + \frac{V^2}{\Omega^2 \lambda_0^2} (n_i^2 - n_d^2) \right]. \quad (1)$$

Угол отклоненного светового пучка в этом случае, не равен углу Брэгга, и определяется из соотношения:

$$\sin \Theta_d = \frac{\lambda_0}{2n_d \Lambda} \left[1 - \left(\frac{\Lambda}{\lambda_0} \right)^2 (n_i^2 - n_d^2) \right] = \frac{\lambda_0 \Omega}{2n_d V} \left[1 - \frac{V^2}{\Omega^2 \lambda_0^2} (n_i^2 - n_d^2) \right]. \quad (2)$$

Зависимость углов Θ_d и Θ_i из (1, 2) от частоты акустической волны Ω , для случая $n_i > n_d$ представлена на рис. 1, из которого видно, что при анизотропной дифракции существует минимальная частота акустической волны - Ω_x , ниже которой дифракция с поворотом плоскости поляризации становится невозможной. Формально Ω_x определяется (3,4). Согласно графическому виду зависимости (рис. 2.), при изменении акустической частоты вблизи Ω_o , угол Брэгга меняется незначительно, в то же время как угол дифракции Θ_d изменяется в широких пределах.



$$\Omega_x = \frac{V}{\lambda_0} (|n_i \pm n_d|) \quad (3)$$

$$\Omega_x = \frac{V}{\lambda_0} (|n_i - n_d|) = \frac{V}{\lambda_0} |\Delta n| \quad (4)$$

Рис.2. Угло-частотные характеристики дифракции при анизотропном акустооптическом взаимодействии

Анизотропная дифракция отличается возможностью коллинеарного акустооптического взаимодействия, при котором волновые вектора падающего и дифрагированного световых пучков параллельны и направлены в одну сторону. Такое акустооптическое взаимодействие возможно, если частота акустической волны определяется (4). Формальное описание процесса коллинеарного акустооптического взаимодействия рассмотрим на примере акустооптической ячейки с коллинеарным акустооптическим взаимодействием, структурные элементы которой показаны на рис. 3.

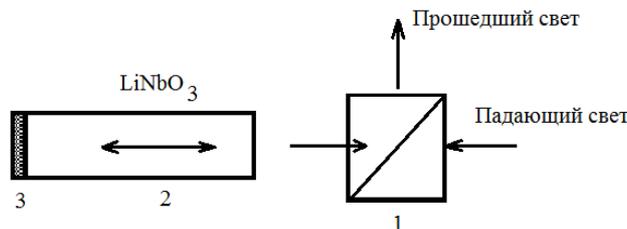


Рис. 3. Структура акустооптической ячейки с коллинеарным акустооптическим взаимодействием, где 1 – поляризатор (призма Глана); 2 – светозвукопровод; 3 – пьезопреобразователь продольной акустической волны

Уравнения связанных волн для коллинеарной акустооптической ячейки представим в виде:

$$\begin{cases} \frac{dE_x}{dy} = j \frac{n_i n_d^2 P_{эфф}^2 \omega}{4c} S E_z e^{j\Delta k y} \\ \frac{dE_z}{dy} = j \frac{n_i n_d^2 P_{эфф}^2 \omega}{4c} S^* E_x e^{-j\Delta k y} \end{cases}, \quad (5)$$

где $\Delta k = k_i - k_d - K$, $P_{эфф}$ - эффективная фотоупругая константа, S - упругая деформация, c и ω - скорость и частота света. Решение системы (5) с учетом граничных условий ($E_x=0$, $E_z(0) = E_z^0$) позволяет найти акустооптическую эффективность дифракции в виде:

$$\frac{I_d}{I_i} = \Gamma^2 L^2 \frac{\sin^2(L^2 \Gamma^2 + \Delta k^2 L^2 / 4)^{1/2}}{L^2 \Gamma^2 + \Delta k^2 L^2 / 4}, \quad (6)$$

$$\Gamma^2 = \frac{(n_i n_d P_{эфф})^2 \pi^2}{4\lambda_0^2} |S|^2 = \frac{n_i^3 n_d^3 P_{эфф}^2 \pi^2}{2\rho V^3 \lambda_0^2} \left(\frac{P_a}{A}\right), \quad (7)$$

где ρ - плотность, V - скорость акустической волны и P_a / A - плотность мощности акустической волны в среде акустооптического взаимодействия. Из выражения (6) следует, что при фазовом синхронизме волновых векторов, т.е. при $\Delta k = 0$, $I_d / I_i = \sin^2 \Gamma L$, т.е. для получения 100% эффективности дифракции необходимо выполнение условия:

$$\Gamma L = \pi / 2. \quad (8)$$

Откуда, плотность мощности акустической волны равна:

$$P_a / A = \lambda_0^2 / (2L^2 M_{эфф}), \quad (9)$$

где $M_{эфф} = n_i^3 n_d^3 P_{эфф}^2 / (\rho V^3)$ - акустооптическая добротность среды акустооптического взаимодействия коллинеарной акустооптической ячейки. Полученное выражение не учитывает изменения плотности мощности при распространении акустической волны по светозвукопроводу, связанного с ее расходимостью, вязким поглощением и другими причинами. Как показала экспериментальная проверка (8) и (9), более точно процесс коллинеарного акустооптического взаимодействия описывает выражение:

$$\frac{I_d}{I_i}(\omega, \Omega) = K(\omega) \frac{P_a}{P_m} \frac{\sin^2(\pi/2) \sqrt{\frac{P_a}{P_m} + 4(\Delta\Omega)^2 \tau^2}}{\frac{P_a}{P_m} + 4(\Delta\Omega)^2 \tau^2}, \quad (10)$$

где $\frac{I_d}{I_i}(\omega, \Omega)$ - амплитудно-частотная характеристика акустооптического взаимодействия при селекции оптических сигналов акустооптической ячейки. В (10).

$\frac{I_d}{I_i}(\omega, \Omega)$, в общем случае зависит от плотности мощности акустической волны P_a , диапазона частот акустических сигналов $\Delta\Omega$ и амплитудно-частотной характеристики элементов оптической схмотехники, входящих в состав оптического тракта акустооптической ячейки - $|K(j\omega)| = K(\omega)$, P_m - плотность мощности акустической волны, при которой в отсутствие расстройки достигается значение $I_d/I_i=1$.

Важной характеристикой процесса коллинеарного акустооптического взаимодействия является полоса пропускания, которая по уровню 0,5, без учета дисперсии показателя преломления среды акустооптического взаимодействия, определяется:

$$\Delta\lambda = 5\lambda_0^2 / (2\pi\Delta nL). \quad (11)$$

Несложный расчет показывает с то с учетом дисперсии, уравнение (11) можно переписать в виде:

$$\Delta\lambda = 5\lambda_0^2 / [2\pi L(\Delta n + \lambda_0 \frac{\partial \Delta n}{\partial \lambda_0})]. \quad (12)$$

Дисперсия показателя преломления в зависимости от типа среды АОВ может, как увеличивать, так и уменьшать полосу пропускания. Затухание и расходимость акустической волны увеличивает полосу пропускания коллинеарного акустооптического взаимодействия. Одной из основных характеристик коллинеарного акустооптического взаимодействия, является диапазон перестройки оптических волн, соответствующих диапазону частот акустических волн. Как показали экспериментальные исследования коллинеарной акустооптической ячейки, граница диапазона определяется двумя факторами: областью оптической прозрачности среды акустооптического взаимодействия и широкополосностью модуля возбуждения акустической волны. Частота акустической волны может быть найдена из условия синхронизма при коллинеарном акустооптическом взаимодействии, в виде:

$$\Omega_i = (V/\lambda_i)(n_0 - n_e). \quad (13)$$

Тогда задавшись крайними значениями длины волны света, для конкретной среды акустооптического взаимодействия, находятся граничные частоты диапазона акустических частот. Другой важной характеристикой коллинеарной акустооптической ячейки является величина ослабления оптического излучения вдали от центра полосы пропускания. Из выражения (6) наблюдается зависимость акустооптической эффективности от расстройки Δk , которая подчиняется функции типа $(\sin x/x)^2$, характеризующейся наличием боковых максимумов убывающей амплитуды. Очевидно, что при значительных расстройках, акустооптическая эффективность в боковом максимуме имеет вид:

$$(I_i/I_d)_N = 2/[\pi^2(2N+1)^2], \quad (14)$$

где N - относительная расстройка, нормированная к полосе пропускания коллинеарной акустооптической ячейки по уровню 0,5. Откуда следует, что требуемое ослабление принципиально возможно за пределами полосы, определяемой (14). Экспериментальные исследования, показали, что реальное ослабление зависит от качества используемого поляризатора. Следующей важной характеристикой коллинеарной акустооптической ячейки, является её угловая апертура. Полная входная апертура коллинеарной акустооптической ячейки, с погрешностью приемлемой в инженерных расчетах, с учетом преломления света на входной грани среды акустооптического взаимодействия, имеет вид:

$$\Psi = 2n_i(\lambda_0 / L\Delta n)^{1/2}. \quad (15)$$

Быстродействие коллинеарной акустооптической ячейки. Идеализированный вид аппаратной функции коллинеарной акустооптической ячейки, представлен на рис. 4. При анализе числа возможных каналов разуплотнения с помощью коллинеарной акустооптической ячейки, важным фактором является вид спектральной кривой источника излучения, т.е. его полуширина и центральная частота излучения. Быстродействие оптической системы связи ограничено дисперсионными свойствами передающей среды, приводящими к «размытию» формы передаваемого импульса излучения.

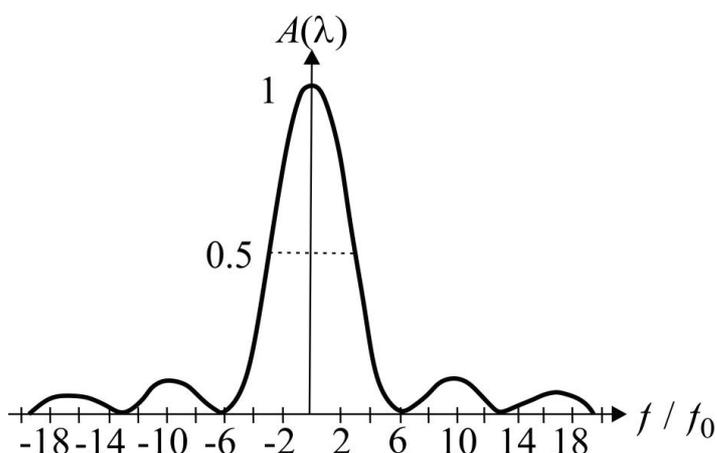


Рис. 4. Идеализированная аппаратная функция КАОЯ [6]

В одномодовых волоконных световодах, это обусловлено зависимостью групповой скорости от длины волны. В многомодовых волоконных световодах, это обусловлено межмодовой дисперсией, которая возрастает пропорционально спектральной ширине оптического сигнала источника. В первом приближении уширение импульса обусловлено материальной дисперсией волоконных световодах, пропорциональной $(\lambda/c)[(\partial^2 n)/(\partial \lambda^2)]$. Увеличению быстродействия препятствует и волноводная дисперсия. В одномодовом волоконных световодах, материальная дисперсия является определяющим фактором, превосходящим дисперсию, определяемую размерными эффектами световода. Коэффициент широкополосности (произведение длины линии на ширину полосы) определяет предельное быстродействие данной линии передачи. Это параметр введен для случая передачи на одной оптической несущей и характеризует предельную широкополосность сигнала, модулирующего оптическую несущую, который может быть передан этой линией на расстояние 1 км, без искажений. Очевидно, что этот же параметр, связанный с частотой

модуляции, устанавливает связь и предельную скорость передачи информации. Так как частота модуляции не может превышать частоты несущей, значит, этот параметр и определяет наибольшее быстродействие. Таким образом, скорость передачи данных $1/T$, где T – временная полуширина передаваемого импульса, для оптических систем связи ограничена рядом факторов: быстродействием источника оптического сигнала или частотой модуляции, дисперсией среды распространения, быстродействием переключателя каналов, быстродействием фотоприемников.

Расчеты показывают, что если спектральная полоса пропускания километрового отрезка волоконных световодах, составляет $0,5 \dots 1,8$ мкм, что соответствует предельному быстродействию $2,5 \cdot 10^5$ Гбит/с, то дисперсия среды ограничивает эту величину до 250 Гбит/с. Предельная частота следования импульсов лазерных источников составляет 10^3 ГГц. Достигнутая скорость переключения каналов механическими устройствами составляет 2,5 кГц, акустооптических ячеек в режиме временного разуплотнения – до 1,5 ГГц, электрооптических переключателей – до 300 МГц [3]. Быстродействие серийных фотоэлектронных умножителей, составляет ~ 200 ГГц. Приведенные оценки быстродействия элементов систем оптической связи показывают, что самыми инерционными являются переключатели. При использовании КАОЯ, в качестве переключателя, быстродействие его будет определяться временем пробега фронта акустической волны по среде акустооптического взаимодействия. Если длина среды акустооптического взаимодействия составляет ~ 20 см, при скорости акустической волны 5750 м/с, время заполнения среды акустооптического взаимодействия акустической волной составит $\tau = L/V = 35$ мс. Таким образом, предельная скорость посылки импульса акустической волны, с другой частотой заполнения не превышает $\tau^{-1} = 27$ кГц. Откуда следует, что предельная скорость произвольного переключения информации из канала в канал с помощью коллинеарной акустооптической ячейки не превышает 27 кбит/с.

Выводы. По исследованиям элемента спектрального разуплотнения предложено математическое описание и модель элемента спектрального разуплотнения оптического потока данных, на основе коллинеарной акустооптической ячейки (6, 7). Представлены расчетные соотношения, позволяющие определить полосу оптических частот и оптическое разрешение коллинеарной акустооптической ячейки – $\Delta\lambda$ (11, 12), частоты синхронизма – $\Delta\Omega_i$ на которых возможно коллинеарное акустооптическое взаимодействие (13) а также входную угловую апертуру КАОЯ – Ψ (15). Величина боковых максимумов аппаратной функции коллинеарной акустооптической ячейки уменьшается по мере удаления от центра полосы пропускания, однако, степень спада величины боковых максимумов не соответствует зависимости вида $1/(7,5N^2)$, наблюдающейся у теоретической кривой, а существенно слабее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Элементы и устройства на основе одномодовых волоконных световодов / В. В. Данилов [и др.] // Вісник Донецького університету. Серія А: Природничі науки. – 2005. – Ч. 2, № 2. – С. 175-189.
2. Данилов В. В. Оптоэлектронные вычислительные сети / В. В. Данилов, М. В. Плыс, А. Н. Крищенко // Вісник Донецького університету. Серія А: Природничі науки. – 2007. – Вип. 2. – С. 176-197.
3. Шереметьев А. Г. Когерентная оптическая связь / А. Г. Шереметьев. – Москва : Радио и связь, 1991. – 190, [2] с.
4. Данилов В. В. Соотношение сигнал-помеха в каналах ВОЛС на основе акустооптической ячейки для оптоэлектронных вычислительных средств / В. В. Данилов, Л. М. Роганов // Радиотехника. – Запорожье, 1995 – № 31 – С. 285–294.

5. Третьяков И. А. Алгоритм расчета акустооптического устройства по виду электрооптической кривой / И. А. Третьяков, Т. В. Белик // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 2. – С. 9-19.
6. Третьяков И. А. Технология реализации акустооптических устройств / И. А. Третьяков, Т. В. Белик // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 3. – С. 11-15.
7. Оптические информационные технологии. Преобразование радиосигналов / И. А. Третьяков, М. Л. Павлов, Т. С. Тебенева, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. – 2016. – № 2. – С. 83-90.
8. Плотниченко В. Г. Волоконные световоды среднего инфракрасного диапазона : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.04.10 / В. Г. Плотниченко ; Рос. АН Науч. центр волоконной оптики при ин-те общей физики. – Москва, 1995. – 91 с.
9. Балакший В. И. Физические основы акустооптики / В. И. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. Е. Чирков. – Москва : Радио и связь, 1985. – 280 с.
10. Данилов В. В. Физические основы построения акустооптических устройств селекции оптических сигналов // Радиотехника : всеукр. науч.-техн. сб. – Харьков, 2001. – Вып. 117. – С. 65-70.

Поступила в редакцию 19.11.2018 г.

MODEL OF ACOUSTIC ELEMENT OF SPECTRAL COMPOSITION-DECLAMMATION OF DATA OF AUTOMATED SYSTEMS

A. Shalaev, V. Danilov

This paper proposes a mathematical description and a model of the acoustic element of spectral seals - decompression of data streams of automated information and communication systems based on acousto-optic interaction. The speed of a collinear acousto-optic cell is calculated.

Keywords: acousto-optic interaction; compaction-decomposition; fiber light guide; hardware function.

Шалаев Андрей Васильевич

аспирант кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: pers2tz.ru@mail.ru

Shalaev Andrei

Postgraduate student at Department of physics and information and communication technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

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

Danilov Vladimir

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

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.565.93/95:532.529

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ В ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ С НАСАДОЧНЫМ СЛОЕМ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДЫ

© 2018 *В.В. Карнаух, М.А. Пундик*

В статье предложен метод расчета вентиляторных пленочных градирен с учетом фазовых термических сопротивлений воздушного и водяного потоков, основанный на представлениях об аддитивности фазовых термических сопротивлений и неравномерности распределения контактирующих потоков. Приведен пример расчета реальной вентиляторной градирни.

Ключевые слова: противоточная градирня; тепломассообмен; фазовые термические сопротивления; энтальпия; эквивалентный диаметр; насадочный слой.

На сегодняшний день промышленный и агропромышленный комплексы, системы кондиционирования, пищевая промышленность (заводы по производству майонеза, растительного масла, молока и молочных продуктов, виноделия и т.д.) требуют водоохлаждающие системы, легко меняющиеся в зависимости от нагрузки.

Средняя потребность в охлаждающей воде на предприятиях пищевых производств составляет от 25 ... 300 м³/ч, поэтому наиболее перспективным является разработка типоразмерного ряда градирен с производительностью в каждой секции от 25 ... 100 м³/ч воды. Использование принципа многосекционной сборки таких автономных секций позволит обеспечить любую необходимую производительность охлаждающей воды.

Основные пути совершенствования градирен: интенсификация теплообменных процессов, решение проблемы масштабирования, преимущественно связана с неравномерностью распределения потоков газа и жидкости по сечению рабочей зоны аппарата, поиск и выбор новых материалов и конфигураций насадочного слоя.

При расчете пленочных аппаратов особое внимание уделяется определению коэффициента тепломассопереноса. Существует ряд расчетных методик, но большинство из них не учитывает особенности контакта потоков.

Мак-Адамсом [4] был предложен графический метод, пригодный для расчета величин пленочных коэффициентов α_r , β_n . Графоаналитический метод анализа предложен Mickley Н. и Mizushima Т. [1]. Он справедлив для системы вода-воздух в процессах, как испарения, так и конденсации. Но метод очень трудоемкий, к тому же точность его снижается из-за большого количества графических построений. Он выдвигает особые требования к измерению состояния воздуха, который покидает теплообменный аппарат.

Поэтому цель статьи заключается в разработке методики расчета пленочных вентиляторных градирен с учетом фазовых термических сопротивлений воздушного и водяного потоков, основанной на представлениях об аддитивности фазовых термических сопротивлений и неравномерности распределения контактирующих потоков. Эта методика необходима для определения и подбора элементов градирни (например, насадочного слоя - оросителя).

Основываясь на совместных исследованиях, выполненных совместно с учеными ОГАХ [3], в статье приведена усовершенствованная методика расчета пленочных аппаратов на примере промышленной противоточной пленочной градирни производительностью $G_{жс} = 100 \text{ м}^3/\text{ч} = 0,028 \text{ м}^3/\text{с}$.

Методика инженерного расчета вентиляторной градирни с насадкой пленочного типа построена на основании результатов выполненных теоретических и экспериментальных исследований в работе [3].

Принимались следующие исходные данные:

- тип аппарата – пленочный, с насадкой упорядоченной структуры РН;
- тепловая нагрузка Q , кВт;
- расход продуктовой охлаждаемой воды $G_{жс}$, м³/час;
- параметры наружного воздуха (принимаем по СНиП для определенного города):

t_2^1, h_2^1 .

Расчетная схема противоточной градирни представлена на рис. 1. Охлаждение воды, то есть разность температур, на которую охлаждается вода, определяется обслуживаемым оборудованием. Например, для холодильной установки $t_{жс}^1 \leq 35^\circ \text{C}$.

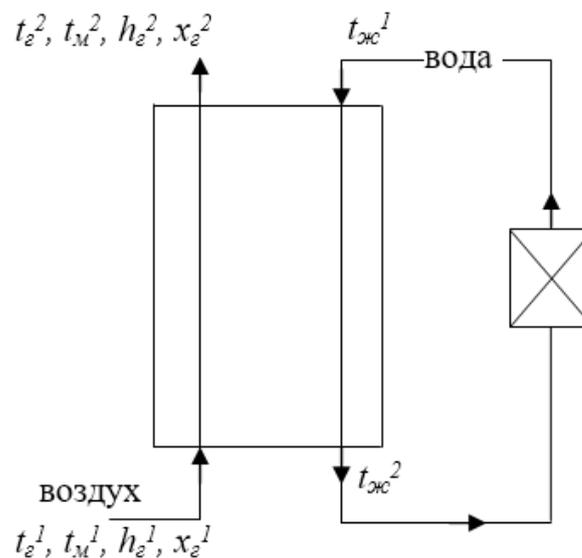


Рис.1. Условная расчетная схема противоточной градирни

Основным уравнением, описывающим тепломассообменные процессы в системе «вода-воздух», является уравнение Меркеля (1) [1]:

$$dQ_{\Sigma} = K_h \cdot (h_2^* - h_2) \cdot dF, \quad (1)$$

где h_2 – энтальпия 1 кг влажного воздуха в ядре потока, кДж/кг; h_2^* – энтальпия насыщенного влажного воздуха, кДж/кг; K_h – общий коэффициент тепломассопереноса, отнесенный к разности энтальпий, кг/(м²с).

Уравнения (1) позволяет существенно упростить расчет процессов тепломассообмена, поскольку используется одна движущая сила – энтальпийный напор, и вместо коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи – один коэффициент тепломассопереноса.

Коэффициент тепломассопереноса можно определить несколькими методами [1]:

- а) Используя уравнение (2):

$$K_h = \frac{Nu_D D}{d_3}, \quad (2)$$

где D - коэффициент диффузии, м²/с; Nu_D - число Нуссельта диффузное; d_3 - эквивалентный диаметр насадки, м.

По зависимостям, полученным в [5] для противоточной схемы можно записать следующую критериальную зависимость:

$$Nu_D = 0,45 \cdot 10^{-4} Re_2^{1,5} Re_{жс}^{0,4}. \quad (3)$$

б) Используя уравнение (4):

$$K_h = a_1 \cdot a_2 \cdot [2,4 + 6,48 \cdot (\rho_2 \cdot \omega_2) - 0,19 \cdot (\rho_2 \cdot \omega_2)^2 - 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot (\rho_2 \cdot \omega_2) \cdot t_{p2} - 3 \cdot 10^{-2} \cdot t_{p2} - t_{p2}^2 \cdot 10^{-3}] \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где a_1 и a_2 - поправочные коэффициенты, рассчитываемые, соответственно, по приведенным ниже формулам:

$$a_1 = 1,35 \cdot 9,29 \cdot d_3 + 45,45 \cdot d_3^2 = 1,35 \cdot 9,29 \cdot 0,045 + 45,45 \cdot 0,045^2 = 1,024.$$

$$a_2 = 1,02 - 0,004 \cdot \left(\frac{L}{d_3}\right) + 26 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{L}{d_3}\right)^2 = 1,02 - 0,004 \cdot \left(\frac{0,5}{0,045}\right)$$

$$+ 26 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{0,5}{0,045}\right)^2 = 0,979.$$

Тогда,

$$K_h = 1,024 \cdot 0,979 \cdot [2,4 + 6,48 \cdot (5 \cdot 1,29) - 0,19 \cdot (5 \cdot 1,29)^2 - 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot (5 \cdot 1,29) \cdot 37 - 3 \cdot 10^{-2} \cdot 37 - 37^2 \cdot 10^{-3}] \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0,032 \frac{\text{Кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Движущей силой процессов тепломассопереноса является разность значений энтальпии. Найдем среднюю движущую силу - энтальпийный напор, зная Δh_2^{6blx} и Δh_2^{6x} по уравнению (5):

$$\overline{\Delta h_2} = \frac{\Delta h_2^{6x} - \Delta h_2^{6blx}}{\ln \frac{\Delta h_2^{6x}}{\Delta h_2^{6blx}}}, \quad (5)$$

$$\Delta h_2^{6blx} = h_2^{*1} - h_2^2, \quad \text{где } h_2^{*1} = f(t_{жс}^1);$$

$$\Delta h_2^{6x} = h_2^{*2} - h_2^1, \quad \text{где } h_2^{*2} = f(t_{жс}^2).$$

Более точное значение движущей силы для противотока может быть определено графически и с использованием уравнения (6):

$$\overline{\Delta h_2} = \int_{t_p^1}^{t_p^2} \frac{c_p dt_p}{(h_2^* - h_2)}, \quad (6)$$

На основании уравнения теплового баланса градирни (7):

$$G_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot c_{ж} \cdot (t_{ж}^2 - t_{ж}^1) = G_2 \cdot \rho_2 \cdot (h_2^2 - h_2^1), \quad (7)$$

определяем значение энтальпии на выходе h_2^2 по формуле:

$$h_2^2 = \frac{G_{ж} \rho_{ж} c_{ж} \Delta t_{ж}}{G_2 \rho_2} + h_2^1 \quad (8)$$

где $G_{ж}$ – объемный расход жидкости, м³/сек; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; $c_{ж}$ – удельная массовая теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К); $t_{ж}^2$ – температура подаваемой жидкости, °С; $t_{ж}^1$ – температура охлажденной жидкости, °С; G_2 – объемный расход воздуха, м³/сек; ρ_2 – плотность воздуха, кг/м³; h_2^1 – энтальпия воздуха на входе в градирню, кДж/кг; h_2^2 – энтальпия воздуха на выходе из градирни, кДж/кг.

По заданным данным средняя температура воздуха в наиболее жаркий период года составляет 31 °С, относительная влажность $\varphi = 35\%$. Тогда по $h - d$ -диаграмме влажного воздуха находим, что энтальпия входящего воздуха равна 57 кДж/кг, энтальпия насыщенного воздуха на входе в градирню $h_2^{2*} = 75,5$ кДж/кг.

Определим энтальпию воздуха на выходе из градирни:

$$h_2^2 = \frac{0,028 \cdot 1000 \cdot 4,19 \cdot (37 - 25)}{35 \cdot 1,29} + 57 = 88,2 \text{ кДж/кг.}$$

Тогда значение энтальпийных напоров на входе и выходе градирни составляют, соответственно:

$$\begin{aligned} \Delta h_2^{ex} &= h_2^{*2} - h_2^1 = 75,5 - 57 = 18,5 \text{ кДж/кг.} \\ \Delta h_2^{вх} &= h_2^{*1} - h_2^2 = 147 - 88,2 = 58,5 \text{ кДж/кг.} \end{aligned}$$

где $h_2^{*1} = f(t_{ж}^1) = 147$ кДж/кг – энтальпия насыщенного воздуха при температуре воды на входе в градирни.

Подставляем найденные значения в уравнение (5) и определяем средний энтальпийный напор:

$$\overline{\Delta h_2} = \frac{18,5 - 58,5}{\ln \frac{18,5}{58,5}} = 34,78 \text{ кДж/кг.}$$

Определим тепловую нагрузку:

$$Q = G_{жс} \cdot \rho_{жс} \cdot c_{жс} \cdot \Delta t_{жс} = 0,028 \cdot 1000 \cdot 4,19 \cdot 12 = 1407 \text{ кВт.}$$

Теплообменная поверхность оросителя:

$$F_{op} = \frac{1410}{0,032 \cdot 34,78} = 1263 \text{ м}^2.$$

Определим необходимый объем оросителя:

$$V = \frac{F_{op}}{a} = \frac{1263}{100} = 12,63 \text{ , м}^3 \quad (9)$$

где $a = 100$ - плотность орошения полимерного оросителя, $\text{м}^2 / \text{м}^3$.

Определяем высоту оросителя:
$$h_{op} = \frac{V}{F_c} ,$$

где F_c - площадь одной секции промышленной градирни (определяется пользователем оборудования), м^2 .

$$h_{op} = \frac{12,63}{16} = 0,789 \text{ м.}$$

Анализ изменения состояния воздушного потока по высоте насадочного слоя был выполнен по авторской разработанной компьютерной программе, графическое изображение приведено на рис. 2.

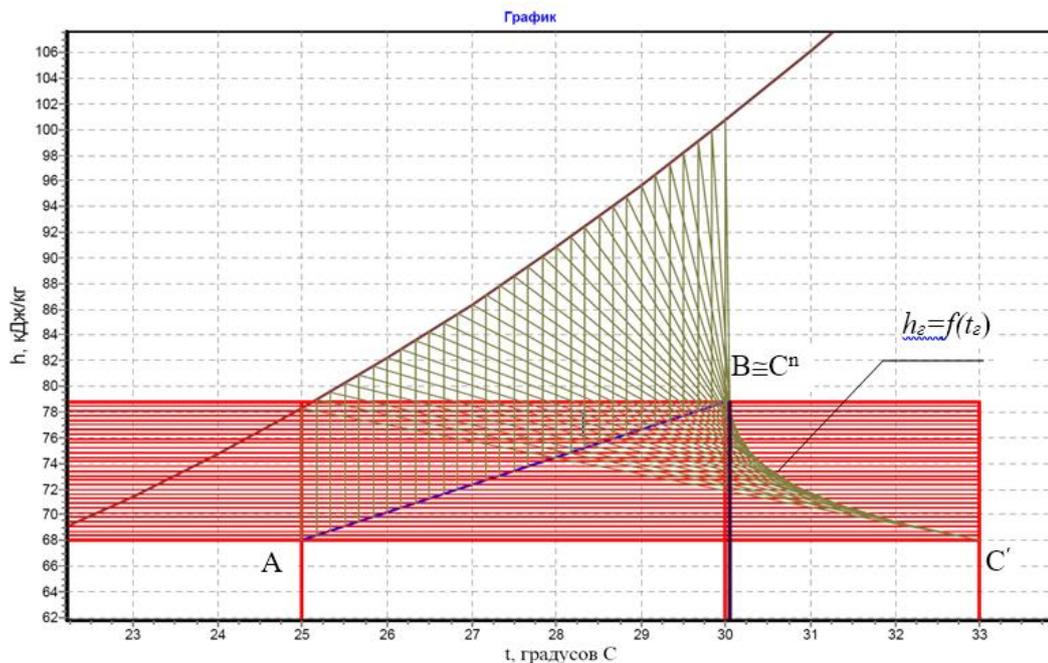


Рис. 2. Демонстрация построения зависимости $h_2 = f(t_2)$ на $h-t$ -диаграмме интервально-итерационным методом для расчета пленочной градирни при соотношении расходов $G_2 / G_{жс} \approx 2$

Предлагаем установить ороситель из поливинилхлоридных листов в два яруса, применяя гофрированный лист размером 1 0,5м с высотой гофры 0,0235м, изготовленный из непластифицированного поливинилхлорида (рис.3). Верхние и нижние кромки каждого листа имеют прямые участки для уменьшения аэродинамического сопротивления.



Рис.3. Общий вид оросителя из поливинилхлоридных листов

Определяем количество блоков оросителя:

$$n = \frac{F_c}{F_{\text{бл}}}, \quad (10)$$

где $F_{\text{бл}}$ - площадь одного блока оросителя, м².

$$n = \frac{16}{0,5} = 32 \text{ шт.}$$

Оросители установлены в два яруса, поэтому суммарное количество блоков в одной секции градири составляет $n_{\text{общ}} = 2 \cdot 32 = 64$ штук.

Работа градири сопровождается потерей воды, которая обусловлена процессом испарения и краплеуносом.

Количество испарившейся воды:

$$n = \frac{c_{жс} \cdot \Delta t}{r} \cdot 100, \quad (11)$$

где r – удельная теплота парообразования, кДж кг.

$$n = \frac{4,19 \cdot 12}{2500} \cdot 100 = 2 \text{ \%}.$$

При использовании водоуловителя пластинчатого из профильных элементов, например, типа ОП - 160, каплеунос составит менее 0,1%.

Задачей аэродинамического расчета является проверка соответствия аэродинамического сопротивления градирни напору, развиваемому вентилятором. В условиях работы градирен подача воздуха вентилятором G_2' определяется полным аэродинамическим сопротивлением градирни, в сумме равным полному давлению, развиваемому вентилятором. Графически это выражается точкой пересечения характеристики вентилятора с аэродинамической характеристикой градирни.

Полное аэродинамическое сопротивление градирни [1]:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4 + \Delta p_5 + \Delta p_6 + \Delta p_7 + \Delta p_8 + \Delta p_9 + \Delta p_{10}, \quad (12)$$

где Δp_1 - сопротивление входа воздуха в градирню, Па;

Δp_2 - сопротивление воздухораспределителя, Па;

Δp_3 - сопротивление поворота потока воздуха в насадочный слой, Па;

Δp_4 - сопротивление при внезапном сужении воздуха на входе в насадочный слой, Па;

Δp_5 - сопротивление насадочного слоя, Па;

Δp_6 - сопротивление при внезапном расширении воздуха на выходе из насадочного слоя, Па;

Δp_7 - сопротивление каплеуловителя, Па;

Δp_8 - сопротивление водораспределителя, Па;

Δp_9 - сопротивление при входе воздуха в вентилятор, Па;

Δp_{10} - сопротивление выходного патрубка из вентилятора, Па.

Величины сопротивлений, входящие в правую часть уравнения (12), определяются по формуле:

$$\Delta p_{1...10} = \zeta_{z1...10} \frac{\rho_2 W_{z1...10}^2}{2}, \quad (13)$$

где $\zeta_{z1...10}$ - коэффициент сопротивления элементов градирни: вход $\zeta_{вх.} = 0,55$;

поворот $\zeta_{пов.} = 0,50$; конфузур $\zeta_{кон.} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{f_{вых}}{f_{вх}}\right)$; выход $\zeta_{вых.} =$

0,55; каплеуловитель $\zeta_{к.ул.} = 3,8$; ороситель $\zeta_{ор.} = 8,8$; $W_{z1...10}$ - скорость движения воздуха в элементах градирни, м/с;

Примем скорость воздуха в оросителе 5 м/с, а в других расчетных сечениях – 2 м/с, тогда потери давления будут равны:

$$\Delta p_{ex1} = \frac{0,55 \cdot 1,29 \cdot 2^2}{2} = 1,42 \text{ Па}$$

$$\Delta p_{пов3} = \frac{0,5 \cdot 1,29 \cdot 2^2}{2} = 1,29 \text{ Па}$$

$$\Delta p_{ор.(4-6)} = \frac{8,8 \cdot 1,29 \cdot 5^2}{2} = 141,9 \text{ Па}$$

$$\Delta p_{вод7} = \frac{3,8 \cdot 1,29 \cdot 2^2}{2} = 9,8 \text{ Па}$$

$$\zeta_{\text{кон.}} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{4,52}{16}\right) = 0,36;$$

$$\Delta p_{\text{кон}9} = \frac{0,36 \cdot 1,29 \cdot 2^2}{2} = 0,93 \text{ Па}$$

$$\Delta p_{\text{вых}10} = \frac{0,55 \cdot 1,29 \cdot 2^2}{2} = 1,42 \text{ Па}$$

Тогда, полное аэродинамическое сопротивление градирни составляет:

$$\Delta p_{\Sigma} = 1,42 + 1,29 + 1,42 + 0,93 + 9,8 + 141,9 = 156,76 \text{ Па}$$

Для обеспечения нужного давления воздуха рекомендуем установить вентиляторные установки АРМВ - 2400, оснащенную электродвигателем РМ 8 - 485D.

Выводы. Основные пути совершенствования градирен, в частности для пищевой промышленности (заводов по производству майонеза, растительного масла, молока и молочных продуктов, заводов виноделия и т.д.) это: интенсификация теплообменных процессов, решение проблемы масштабирования, которая преимущественно связана с неравномерностью распределения потоков газа и жидкости по сечению рабочей зоны аппарата, поиск и выбор новых материалов и конфигураций насадочного слоя.

Усовершенствована методика инженерного расчета пленочных аппаратов с учетом характера изменения состояния воздушного потока по высоте насадочного слоя аппарата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гладков В. А. Вентиляторные градирни (расчет и проектирование) / В. А. Гладков, Ю. И. Арефьев. – Москва : Стройиздат, 1964. – 240 с.
2. Дорошенко А. В. Моделирование процессов тепломассопереноса при непрямом испарительном охлаждении газов и жидкостей / А. В. Дорошенко, К. И. Ржепишевский, Т. В. Титаренко // Холодильная техника и технология. – 1982. – Вып. 35. – С. 97-102.
3. Карнаух В. В. Интенсификация тепломассообменных процессов в вентиляторных градирнях пленочного типа : монография / В. В. Карнаух. – Донецк : ДонНУЭТ, 2010. – 159 с.
4. Мак-Адамс В. Х. Теплопередача / В. Х. Мак-Адамс ; пер. с англ. под ред. Г. С. Белецкого. – Москва : Металлургиздат, 1961. – 518 с.
5. Шервуд Т. Массопередача / Т. Шервуд, Р. Пигфорд, Ч. Уилки. – Москва : Мир, 1982. – 696 с.

Поступила в редакцию 05.11.2018 г.

FEATURES OF HYDRODYNAMICS IN HEAT EXCHANGER WITH NOZZLE FOR WATER COOLING

V. Karnauk, M. Pundik

The method of calculation of water film-type cooling towers with phase thermal resistance of air and water flows, based on ideas about additivity phase thermal resistance, and uneven distribution of contacting streams was proposed. An example of calculating the real cooling fan tower was present.

Keywords: countercurrent film-type cooling tower, heat-mass transfer, phase thermal resistance, enthalpy, equivalent diameter, nozzle.

Карнаух Виктория Викторовна

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры холодильной и торговой техники ГО ВПО "Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского",

ДНР, г. Донецк.

E-mail: karnaukh.vita0629@gmail.com

Karnaukh Viktoriia

PhD in Engineering Science, Associate Professor of Refrigerating and Trade Equipment Department at Mikhail Tugan-Baranovsky Donetsk National University of Economics and Trade, DPR, Donetsk.

Пундик Михаил Александрович

старший преподаватель, аспирант кафедры холодильной и торговой техники ГО ВПО "Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского",

ДНР, г. Донецк.

E-mail: mihailpundik@gmail.com

Pundik Mikhail

Senior Lecturer, Postgraduate at Refrigerating and Trade Equipment Department at Mikhail Tugan-Baranovsky Donetsk National University of Economics and Trade, DPR, Donetsk.

УДК 662.61

ДВУХКОНТУРНАЯ ЭНЕРГОГЕНЕРИРУЮЩАЯ СТАНЦИЯ С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ РАБОЧЕГО ТЕЛА ВТОРОГО КОНТУРА

© 2018 *А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв, В.В. Варакута*

В работе на основании представленных запасов вторичной и низкопотенциальной теплоты не используемой в технологическом цикле и хозяйственной деятельности предприятия (ВНТ), одной из шахт Донбасса, предложена схема двухконтурной, энергогенерирующей станции на базе тепломашинной установки (ТМУ) с низкокипящим рабочим телом в условиях угледобывающей шахты, при использовании в качестве первичной энергии ВНТ. Проанализирован термодинамический цикл и основные энергетические характеристики предложенной схемы в зависимости от изменения температуры атмосферного воздуха.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, вторичные энергоресурсы, ВНТ, подземная угледобыча, цикл Карно, КПД, термодинамический анализ, энергетические характеристики, экономические показатели, энергогенерация.

Введение. В ходе добычи угля подземным способом, с различными теплоносителями сбрасывается огромное количество вторичного и низкопотенциального тепла, не используемого в технологическом цикле и хозяйственной деятельности предприятия (ВНТ). Различная температура источников теплоты, их удалённость друг от друга, как на поверхности так и в горных выработках, обуславливает необходимость съёма и транспортировки ВНТ через промежуточный теплоноситель, в точку преобразования её в механическую, а затем в электрическую энергию, или высокопотенциальную тепловую с заданными параметрами. При применении для энергогенерации ТМУ, в качестве нагревателя используются источники ВНТ шахты, а в качестве холодильника, породы на глубине от 30 до 100 метров, со средней температурой $+12^{\circ}\text{C}$ и атмосферный воздух при его температуре ниже $+12^{\circ}$, которому присущи суточные и сезонные колебания температур. При этом, температурный напор между холодильником и нагревателем энергогенерирующей установки довольно низок и постоянно меняется. Вместе с тем, глубина разработки более 50% шахт Донбасса, превышает 700 метров, что позволяет использовать высокопотенциальную гидравлическую энергию за счёт гидростатического столба жидкой фазы рабочего тела, обусловленного глубиной шахтного ствола. Запасы ВНТ могут достигать значительной величины и даже превышать потребности предприятия в энергоресурсах. [1-3] Поэтому исследование процессов утилизации, трансформации и возвращения в хозяйственный оборот, в виде электроэнергии, вторичных энергоресурсов, являющихся источниками ВНТ, неизбежно образующихся, в течении периода подготовки и разработки месторождений, является актуальным на сегодняшний день, так как, наряду с экологическими проблемами, добывающие предприятия несут и значительные материальные потери.

Состояние вопроса. В настоящее время рассмотрен вопрос эффективности энергогенерирующей станции на базе тепломашинной установки (ТМУ) с паротурбинной установкой (ПТУ) на низкокипящем рабочем теле (НРТ), в условиях угледобывающих шахт при использовании в качестве первичной энергии ВНТ. При этом сравнительная оценка предельно возможной эффективности выполнена для идеального цикла Карно, реализуемого в условиях имеющегося перепада температур

между нагревателем и холодильником, учтена динамика изменения внешних факторов, влияющих на основные энергетические характеристики [3]. Изучены и представлены в виде таблиц и графиков термодинамические характеристики и теплотехнические свойства различных НРТ используемых как в холодильной технике, так и в энергетике [4]. Выполнен анализ гравитационной схемы энергогенерирующей станции, как наиболее простой, а, следовательно, и наиболее дешёвой. Для первичного анализа приняты следующие условия: температура ВНТ - зависит от глубины, (температура нейтральной зоны для нашего региона составляет 8°C на глубине 30 м, а геотермальная ступень - 3°C на каждые 100 м), температуру холодильника - $+12^{\circ}\text{C}$, удельную мощность на муфте электрогенератора $N_{\text{ТМУ}} = 1$ кВт, гидравлическими потерями в элементах схемы пренебрегаем. Выполнен расчёт с шагом по глубине 100 м, при начальном значении 700 м, для рабочих тел: H_2O и R407c . Результаты расчёта представленные в виде графиков (рис. 1) показывают, что КПД установки растёт за счет повышения температуры вмещающих пород и увеличения гидростатической энергии жидкой фазы рабочего тела, зависящей от глубины. [3]

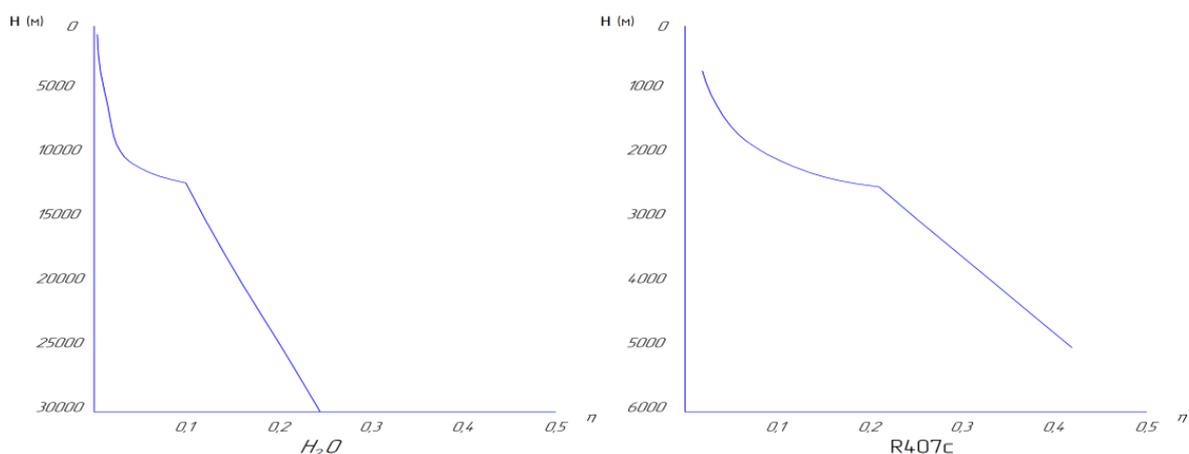


Рис.1. Результаты расчёта

В связи с тем, что более 20% электроэнергии вырабатывается на ГЭС, разработана теория высоконапорных гидроагрегатов. Оборудование ГЭС и ГАЭС различной мощности, стандартизировано и производится серийно [5].

Методика исследования. Анализ работы схемы энергогенерирующей станции, в условиях угольной шахты, выполнен на основании упрощенных расчетных зависимостей для типовых параметров силового, гидроэнергетического и теплотехнического оборудования, а также с учетом известных из литературных источников характеристик процессов образования возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов при подземной добыче угля с глубиной разработки более 800 м. Анализ проводился для условий одной из шахт Донбасса на основании характеристик, представленных в интернет ресурсах: марка добываемого угля Ж, максимальная добыча угля – 2,031 млн. тонн/год, максимальная глубина горных работ – 1400 м, максимальная глубина ствола – 1280 м, температура горного массива – $+49^{\circ}\text{C}$, газоносность угольных пластов шахты составляет от 19 до 23 $\text{м}^3/\text{т}$, общее количество воздуха, подаваемого в шахту – 40 тыс. $\text{м}^3/\text{мин.}$, общий приток воды в действующие горные выработки - 600 - 650 $\text{м}^3/\text{час}$. Средний удельный расход электроэнергии

составил 84,6 кВт·ч/т. Начиная с 2004 года на шахте создавалась самая мощная на постсоветском пространстве когенерационная установка с использованием шахтного метана в качестве топлива (рис. 2).



Рис.2. ТЭС шахты «Засядько», утилизация дегазационного метан

Работы осуществляла компания «Синапс». Здесь создан когенерационный энергетический комплекс на базе 12 газопоршневых установок типа JMS 620 австрийской фирмы «Jenbacher», работающих на шахтном метане с концентрацией 25%. Суммарный КПД этих энергетических установок по теплу и электроэнергии доходит до 86%, что недостижимо на других энергетических объектах. Установленная электрическая мощность одной установки составляет 3,035 МВт, а тепловая – 2,63 Гкал/ч. Основной продукцией энергокомплекса на данной шахте является электроэнергия, вырабатываемая газопоршневыми установками, размещенными в специальном здании. Выработанная электроэнергия, за годовой цикл составляет 122,046 МВт·ч. Одновременно энергокомплекс вырабатывает через систему охлаждения газопоршневой установки тепловую энергию той же мощности (3050 кВт), что и электрической с температурой +110°C.

Базовый вариант использования тепла, вырабатываемого газопоршневой установкой, предусматривает подачу его в систему горячего водоснабжения. В летнее время года, в связи со снижением потребности предприятий в горячей воде, избытки тепла отводятся в окружающую среду. Результаты анализа запасов ВНТ (см. табл.1), показывают, что для данной шахты максимально, суммарные запасы используемые для вторичной электрогенерации могут составить: $W_{\Sigma} = 1040$ кВт·ч на каждую тону добытого угля, т. е. суммарная мощность теплового потока ВНТ для данной шахты может достигать 241,4 МВт. [2] Экономические показатели определялись в соответствии с методиками ценообразования и сметного нормирования в строительстве на основе сметно-нормативной базы РФ.

Таблица 1. Результаты анализа запасов ВНТ

Наименование источника	Способ получения теплоты	Удельные запасы теплоты, кВт·ч/т	Мощность теплового потока, МВт	Температура источника, °С
Дегазационный метан	Сжигание в газопоршневых установках типа JMS 620	Средняя газоносность угольных пластов шахты составляет 21 м ³ /т. КПД газотурбинных и газопоршневых электрогенераторов, теплота выхлопных газов которых может быть использована - 0,36. Низшая теплота сгорания метана 35,8 МДж/м ³ . Количество ВНТ от утилизации метана составит: $W_M = 21 \cdot 35,8 \cdot (1 - 0,36) = 481,2 \text{ МДж/т} = 133,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т.}$ $W_M = 0 \div 133,7$	$Q_1 = 0 \div 31,1$	110
Угольная пыль	Сжигание в котлах пылеугольными горелками и на водоугольной смеси	В отработанном рудничного воздухе, до 85 кг/т угольной пыли, она может быть утилизирована в котлах. Низшая теплота сгорания добываемого угля $Q_H^p = 28 \text{ МДж/кг}$. Количество ВНТ от утилизации пыли выделенной из отработанного рудничного воздуха и шахтных вод составит: $W_{\Pi} = 85 \cdot 28 = 2380 \text{ МДж/т} = 611,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т.}$	$Q_2 = 141,9$	110
Шахтные воды	Природный геотермальный и техногенный характер	Температурный градиент грунта 3°С на каждые 100м, температура удаляемой из шахты воды +49° С, $c = 4187 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ – удельная теплоемкость воды; $m_{\text{во}} = \frac{625 \cdot 1000 \cdot 365 \cdot 24}{2,031 \cdot 10^6} = 2695,7 \text{ кг}$ – среднее количество откачиваемой воды, приведенное к 1 т угля; $\Delta T_{\text{во}} = 27^\circ \text{С}$ – перепад температур откачиваемой воды на входе и выходе водо-водяного теплообменника. Количество ВНТ водоотлива: $W_{\text{вод}} = c \cdot m_{\text{во}} \cdot \Delta T_{\text{во}} = 4187 \cdot 2695,7 \cdot 27 = 304,7 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 84,7 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т.}$	$Q_3 = 19,7$	49

Отработанный рудничный воздух	Природный геотермальный и техногенный характер (при применении установок "VOCSIDIZER")	Количество ВНТ, извлекаемое из отработанного рудничного воздуха, будет равно: $W_{pv} = c_{воз} \cdot m_{воз} \cdot \Delta T_{воз} = 1000 \cdot 11805 \cdot 4 = 47,2 \cdot 10^6$ Дж/т = 13,1 кВт·ч/т, где $c_{воз} = 1000$ Дж/(кг·К) - удельная теплоемкость воздуха, $m_{воз} = 11805$ кг/т - удельный расход воздуха, $\Delta T_{воз} = 4^\circ$ С - перепад температур воздуха на входе и выходе воздушно-водяного теплообменника. (При использовании установок "VOCSIDIZER", температура отработанного рудничного воздуха на выходе из установки увеличивается на 60° С. $W_{pv} = c_{воз} \cdot m_{воз} \cdot \Delta T_{воз} = 1000 \cdot 11805 \cdot 64 = 755,5 \cdot 10^6$ Дж/т = 210 кВт·ч/т.)	$Q_4 = 3$ ($Q_4 = 48,8$)	26 (86)
-------------------------------	--	---	-------------------------------	------------

Постановка задачи исследования. Целью данной работы является анализ схемы энергогенерирующей станции на базе различных типов ТМ и гидроагрегатов (ПТУ на НРТ, гравитационной энергогенерирующей установки, гидротурбины) в качестве потребителя ВНТ и высокопотенциальной гидравлической энергии, получаемой за счёт гидростатического столба жидкой фазы рабочего тела, для производства электроэнергии, в условиях рассматриваемой угольной шахты, и определение её возможных энергетических характеристик.

Результаты исследования. В связи с наиболее подходящими теплотехническими и технологическими характеристиками, экологической безопасностью и относительно низкой стоимостью, низкокипящим рабочим телом выбран фреон R407с. Проанализирован вариант схемы отбора теплоты от первичных источников с различными температурами и транспортировки её к интегральному теплообменнику в точку трансформации в электрическую энергию. (Рис.3) Количество низкопотенциального тепла, которое может быть использовано при данной схеме: $Q_{3-4} = (i_{Г3} - i_A) \cdot G_{1,2} = (264,6 - 232,6) \cdot 921,2 = 29478$ кВт, где $i_A = 232,6$ КДж /кг - энтальпия НРТ, при его температуре $T_x = +22^\circ$ С, на теплообменнике конденсатора. Так как температура воздуха на выходе из ствола $+26^\circ$ С и $Q_4 = 3000$ кВт, использовать низкопотенциальное тепло отработанного рудничного воздуха в данных условиях нецелесообразно из за малого перепада температур и как следствие, больших габаритов и стоимости теплообменника. Найдём количество ВНТ, которое может быть использовано в данных условиях: $i_{Г3(1)} = \frac{Q_3}{G_{1,2}} + i_A = \frac{19700}{921,2} + 232,6 = 254$ КДж /кг. $G_{1,2(1)} = \frac{31100+141900}{452,4-254} = 872$ кг/с; $i_{Г3(2)} = \frac{19700}{872} + 232,6 = 255,2$ КДж /кг; $G_{1,2(2)} = \frac{31100+141900}{452,4-255,2} = 877,3$ кг/с; $i_{Г3(3)} = \frac{19700}{877,3} + 232,6 = 255,1$ КДж /кг; $G_{1,2(3)} = \frac{31100+141900}{452,4-255,1} = 876,8$ кг/с; $i_{Г3(4)} = \frac{19700}{876,8} + 232,6 = 255,1$ КДж/кг.

$$Q_{\Sigma} = (i_1 - i_A) \cdot G_{1,2(3)} = (452,4 - 232,6) \cdot 876,8 = 192721 \text{ кВт. [3]}$$

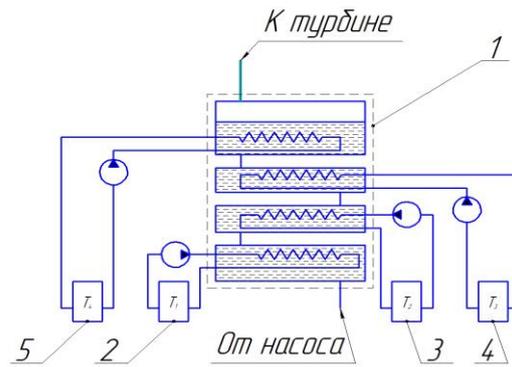


Схема подвода тепла в испаритель ТМУ;
 1 – интегральный теплообменник; 2 – воздушно-водяной теплообменник рудничного воздуха (T_1); 3 – водо-водяной теплообменник главного водоотлива (T_2); 5 – котлы системы утилизации угольной пыли (T_3); 4 – водо-водяной теплообменник утилизации метана (T_4);
 $T_1 < T_2 < T_3 < T_4$.

Рис.3. Схема отбора теплоты от первичных источников

Для более полного использования запасов основных источников ВНТ, предлагается схема гибридной, двухконтурной энергогенерирующей установки с отдельным подводом теплоты к каждому контуру от различных источников, регенерацией теплоты отводимой от первого контура при отсутствии массообмена между контурами. Первый контур представляет традиционную паротурбинную установку на низкокипящем рабочем теле. Второй контур – гравитационную установку. (рис.4)

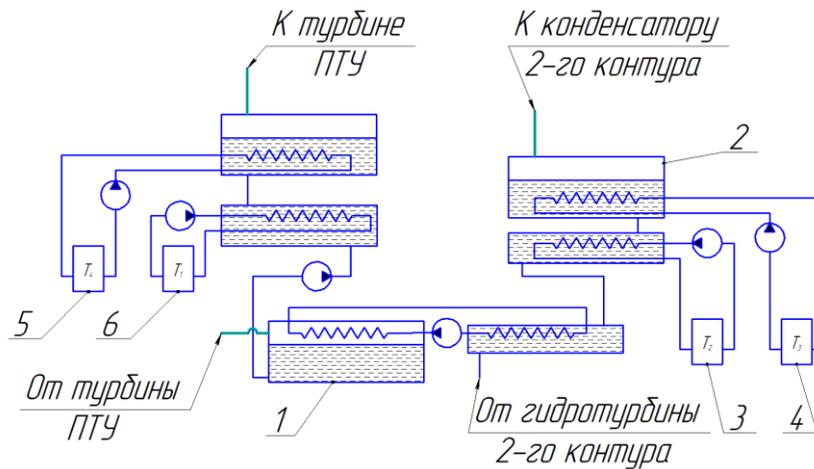


Схема подвода тепла в двухконтурной ЭС.
 1 – конденсатор ПТУ; 2 – испаритель 2-го контура; 3 – воздушно-водяной теплообменник рудничного воздуха (T_1); 4 – водо-водяной теплообменник главного водоотлива (T_2); 5 – котлы системы утилизации угольной пыли (T_3); 6 – водо-водяной теплообменник утилизации метана (T_4);

Рис. 4а. Схема подвода тепла в двухконтурной ЭС

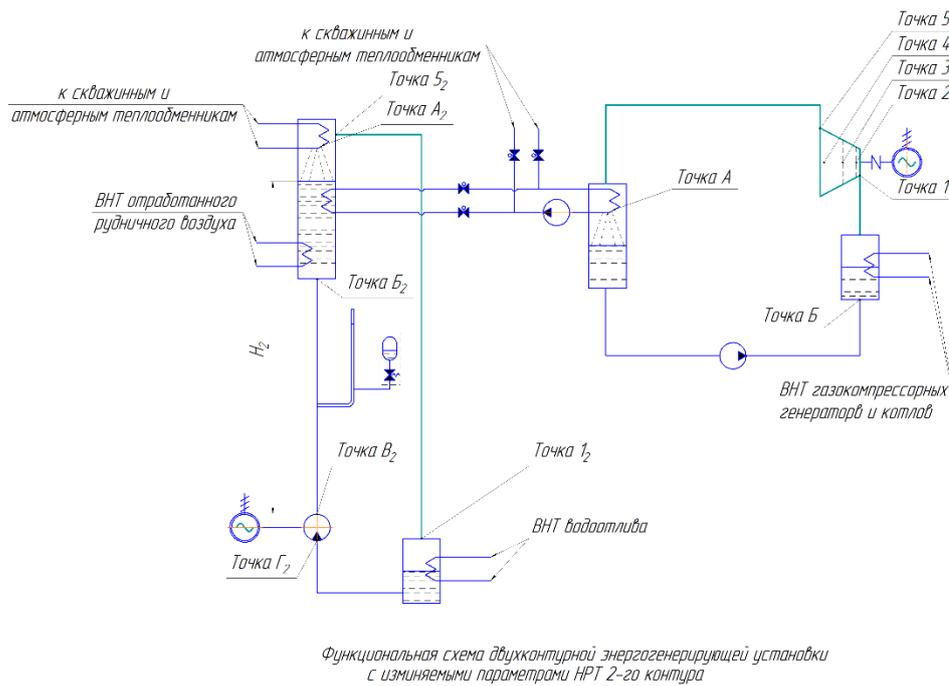


Рис. 46. Функциональная схема двухконтурной ЭУ

Эта установка является основным элементом, трансформирующим ВНТ в электроэнергию. Ввиду, очевидно, малого теплоперепада на паровой турбине, для расчёта принята паротурбинная установка с пароперегревателем, с одновенечной, с одной ступенью скорости, конденсационной, осевой турбиной работающей на перегретом паре. Представлены термодинамические циклы каждого контура установки (рис.5 – для первого контура, рис.6 – для второго).[4]

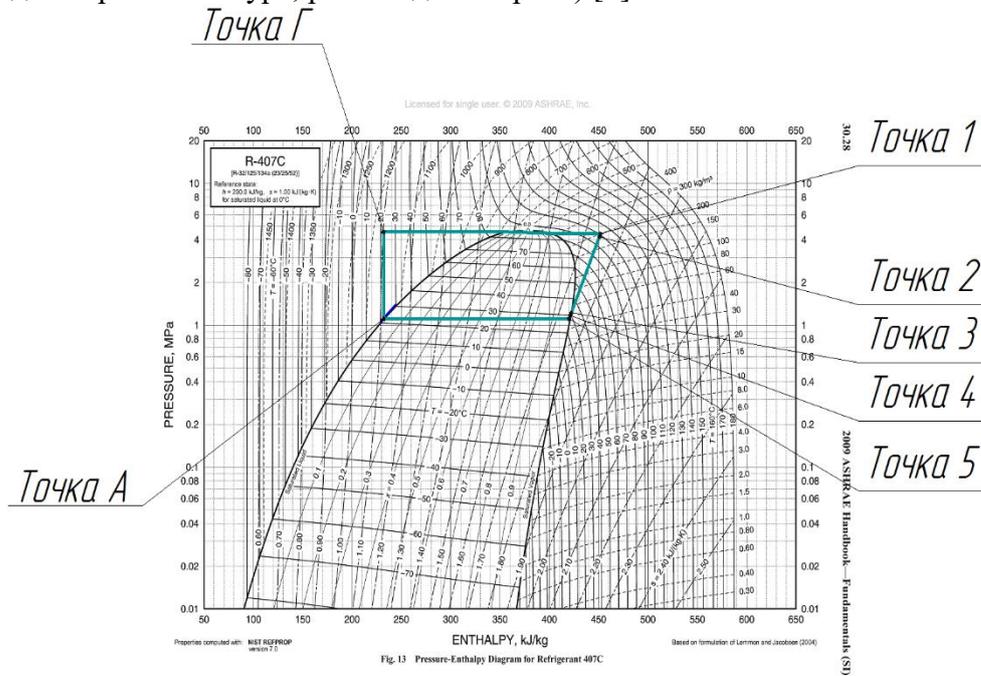


Рис. 5. Термодинамические циклы для первого контура

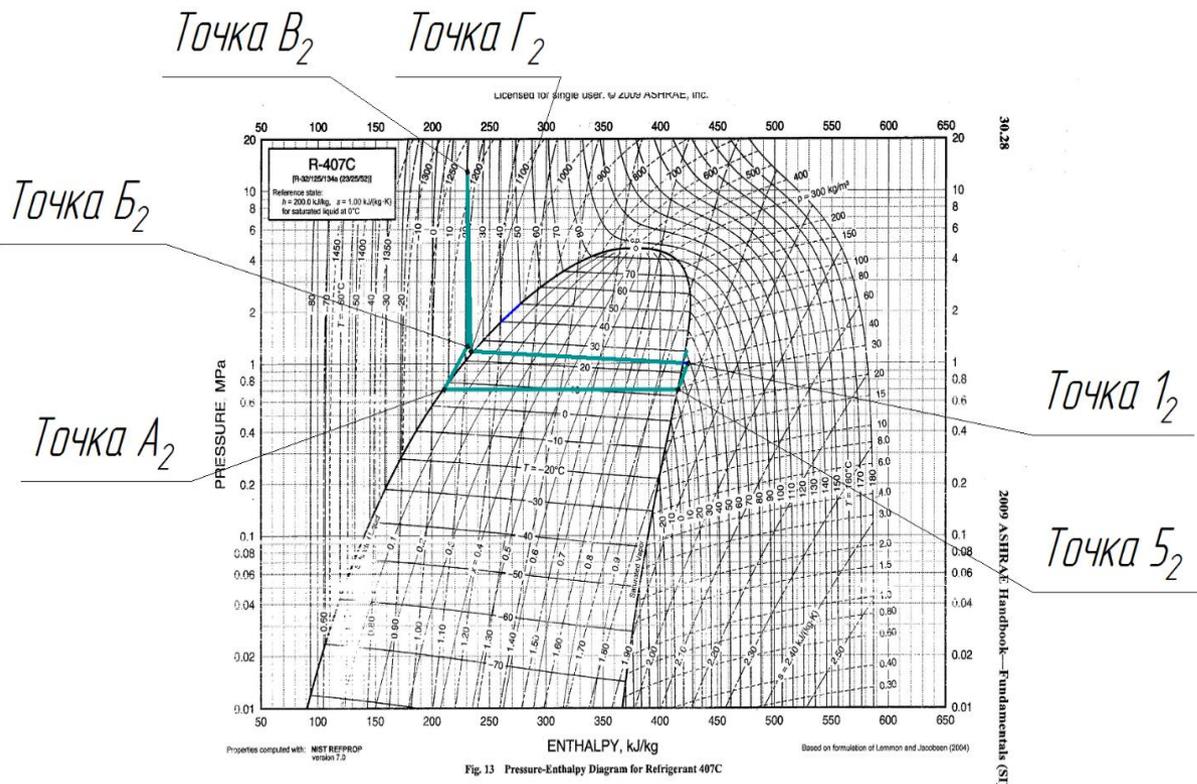


Рис. 6. Термодинамические циклы для второго контура

Параметры точек необходимые для расчёта сведены в таблицу 2. Определены реальные энергетические характеристики, которые могут быть получены в условиях рассматриваемой шахты. КПД установки посчитан при температуре холодильника (атмосферный воздух) ниже +1°C. Получены укрупнённые экономические показатели установки. Основные результаты расчёта представлены в виде таблицы 3.

Таблица 2. Параметры точек необходимые для расчёта

Точка	Положение на схеме (рис.4б)	Параметр	Единица измерения	Значение	
				1-й контур	2-й контур
A	На теплообмнике конденсатора	i_A	КДж/кг	232,6	232,6
		T_A	°C	+22	+22
A ₂	На теплообмнике конденсатора	i_{A2}	КДж/кг	-	210
		T_{A2}	°C	-	+7
B ₂	На входе в гидротурбину	p_{B2}	МПа	-	14
1	На входе в ПТУ	p_1	МПа	4,36	4,36
		i_1	КДж/кг	452,4	452,4
		γ_1	кг/м ³	192	192

Точка	Положение на схеме (рис.4б)	Параметр	Единица измерения	Значение	
				1-й контур	2-й контур
1 ₂	На выходе из испарителя	p_{12}	МПа	-	1,03
		i_{12}	КДж/кг	-	423,8
		γ_{12}	кг/м ³	-	42
5	На выходе из ПТУ	p_5	МПа	1,14	1,14
		i_5	КДж/кг	420,5	420,5
5 ₂	На входе в конденсатор	p_{52}	МПа	-	0,72
		i_{52}	КДж/кг	-	415

Таблица 3. Основные результаты расчёта

№	Параметр и формула	Единицы измерения	Значения	
			1-й контур	2-й контур
1	H_2 - расстояние по вертикали от зеркала конденсата до входа в гидротурбину	м	-	1278
2	$Q_{ВНТ\Sigma}$ - располагаемое количество ВНТ	кВт	192721	-
3	Количество ВНТ подводимое к НРТ в испарителе-пароперегревателе первого контура $Q_{ВНТ и} = 0,95 * Q_{ВНТ\Sigma}$	кВт	185935	-
4	Давление пара перед соплами $p_2 = 0,95 * p_1$	МПа	4,14	-
5	i_2 - энтальпия пара перед соплами	КДж/кг	451,2	-
6	λ - коэффициент сопротивления выхлопного патрубка (принимаем)	-	0,06	-
7	$c_{вп}$ - скорость пара в выходном сечении выхлопного патрубка турбины (для конденсационной турбины принимаем)	м/с	110	-
8	Падение давления в выходной коробке и выхлопном патрубке турбины $\Delta p = p_5 * \lambda * \left(\frac{c_{вп}}{100}\right)^2$	МПа	0,083	-
9	Давление за рабочими лопатками венца рабочего колеса $p_4 = p_5 + \Delta p$	МПа	1,22	-
10	i_4 - энтальпия пара за рабочими лопатками венца рабочего колеса	КДж/кг	421,8	-
11	Теплоперепад идеальной турбины $H_{0ид}^T = i_1 - i_5$	КДж/кг	31,9	-
15	Располагаемый (перерабатываемый) теплоперепад ступени $H_0^T = i_1 - i_4$	КДж/кг	30,6	-

№	Параметр и формула	Единицы измерения	Значения	
			1-й контур	2-й контур
16	ρ – степень реактивности для активной ступени (принимаем)	–	0,03	–
17	Теплоперепад перерабатываемый в сопловой решётке $H_{0c} = H_0^T * (1 - \rho)$	–	29,7	-
18	Энтальпия пара за сопловой решёткой $i_3 = i_1 - H_{0c}$	-	422,7	–
19	p_3 – давление пара за сопловой решёткой	МПа	1,27	-
20	Условная теоретическая изоэнтропная скорость истечения пара из сопел $C_a = \sqrt{2000 * H_0^T}$	м/с	247,4	–
21	$\frac{u}{c_a}$ – отношение условной теоретической изоэнтропной скорости и окружной скорости диска рабочего колеса (принимаем)	–	0,4	–
22	Окружная скорость вращения диска рабочего колеса по среднему диаметру $U = \left(\frac{u}{c_a}\right) * C_a$	м/с	98,8	–
23	n_m - частота вращения генератора (принимаем)	c^{-1}	25	25
24	Средний диаметр рабочего колеса $d = \frac{U}{\pi * n_m}$	м	1,26	-
25	Расхода пара в данном режиме $G = \frac{Q_{внт и}}{i_1 - i_A}$	кг/с	845,9	-
26	Количество теплоты подводимое к НРТ в испарителе-пароперегревателе 2-го контура $Q_{и2} = G * (i_5 - i_A) * 0,95 + Q_3$	кВт	–	154002
27	Расхода пара в данном режиме во втором контуре $G_2 = \frac{Q_{и2}}{i_{12} - i_{A2}}$	кг/с	–	722,1
28	η'_{oi} - внутренний относительный КПД паровой турбины	-	0,826	–
29	Использованный теплоперепад $H_i = H_0^T * \eta'_{oi}$	КДж/кг	25,3	-
30	η_{tm} – механический КПД паровой турбины	-	0,98	-
31	$\eta_э$ – КПД электрогенератора	-	0,95	0,95
32	Мощность электрогенерации паровой турбины $N_{пт} = G * H_i * \eta_{tm} * \eta_э$	кВт	19925	–
33	η_r – гидравлический КПД контура	-	-	0,65

№	Параметр и формула	Единицы измерения	Значения	
			1-й контур	2-й контур
34	Мощность электрогенерации гидроагрегата $N_{R407c} = \frac{G_2 \cdot g \cdot (H_2 - P_{12})}{1000} * \eta_{\Gamma} * \eta_{\Delta}$	кВт	-	8323
35	Суммарная мощность электрогенерации $N_{\Sigma} = N_{ПТ} + N_{R407c}$	кВт	28248	
36	Суммарный КПД установки $\eta_{\Sigma} = \frac{N_{\Sigma}}{Q_{внт\Sigma}}$	-	0,14	
37	$c'_{ПТУ}$ - удельная стоимость оборудования приведенного к одному кВт установленной мощности ПТУ	Рос. Руб.	$3,2 \cdot 10^5$	-
38	Стоимость ПТУ на НРТ $C_{\Sigma} = c'_{ПТУ} * N_{ПТ}$	Рос. Руб.	$6,4 \cdot 10^9$	-
39	c'_{Γ} - удельная стоимость оборудования приведенного к одному кВт установленной мощности гидротурбины	Рос. Руб.	-	$1,28 \cdot 10^4$
40	Стоимость гидротурбины $C_{\Gamma} = c'_{\Gamma} * N_{R407c}$	Рос. Руб.	-	$1,1 \cdot 10^8$
41	$c'_{тр}$ - удельная стоимость одного мп теплотрассы в комплекте, проложенной в шахтном стволе	Рос. Руб.	-	$1,4 \cdot 10^4$
42	Длина технологических трубопроводов 2-го контура в шахтном стволе $H_{\Gamma} = H_2 * 2 + 100$	м	-	2660
43	Стоимость технологических трубопроводов 2-го контура в комплекте $C_{\Gamma} = c'_{тр} * H_{\Gamma}$	Рос. Руб.	-	$3,7 \cdot 10^7$
44	$M_{НРТ}$ – количество НРТ во 2-м контуре	кг	-	$1,6 \cdot 10^5$
45	$c'_{НРТ}$ - стоимость 1-го кг R407c	Рос. Руб.	236	236
46	Полная стоимость НРТ $C_{НРТ} = M_{НРТ} * c'_{НРТ}$	Рос. Руб.	-	$3,8 \cdot 10^7$
47	Стоимость КИП и автоматики $C_{КИП} = (C_{\Gamma} + C_{\Gamma} + C_{НРТ}) * 0,3$	Рос. Руб.	-	$5,6 \cdot 10^7$
48	Капитальные затраты по 2-му контуру $C_{\text{К}} = C_{\Gamma} + C_{\Gamma} + C_{НРТ} + C_{КИП}$	Рос. Руб.	-	$2,4 \cdot 10^8$
49	Накладные и амортизационные расходы по 2-му контуру $C_{\text{н}} = C_{\text{К}} * 0,4$	Рос. Руб.	-	$0,96 \cdot 10^8$
50	Стоимость 2-го контура $C_2 = C_{\text{К}} + C_{\text{н}}$	Рос. Руб.	-	$3,36 \cdot 10^8$

№	Параметр и формула	Единицы измерения	Значения	
			1-й контур	2-й контур
51	Стоимость установки $C_{\Sigma} = C_{\text{ПТУ}} + C_2$	Рос. Руб.	$6,7 \cdot 10^9$	
52	Среднесуточный тариф на электроэнергию	Рос. Руб. за кВт · ч	2,2	
53	$\kappa_{\text{и}}$ - коэффициент использования оборудования	-	0,9	
54	Стоимость электроэнергии за годовой цикл $C_3^{\text{год}} = \kappa_{\text{и}} * N_{\Sigma} * 2,2 * 24 * 365$	Рос. Руб.	$4,9 \cdot 10^8$	
55	Срок окупаемости установки $T = \frac{C_{\Sigma}}{C_3^{\text{год}}}$	год	13,7	

Выводы:

1. Для более полного использования ВНТ (в том числе и низкопотенциального тепла отработанного рудничного воздуха) наиболее простой и экономичной является схема двухконтурной энергогенерирующей станции с отдельным подводом теплоты к каждому контуру от различных источников и регенерацией теплоты отводимой от первого контура при отсутствии массообмена между контурами.

2. Использование установки данного типа, позволяет полностью утилизировать весь поток ВНТ, максимальный КПД такой установки достигается при снижении температуры атмосферного воздуха ниже +1 °С и составляет 14%, мощность электрогенерации при этом достигнет 28,2 МВт, что больше, чем на треть превышает потребности в электроэнергии рассматриваемой шахты.

3. Стоимость второго контура достаточно низка (порядка 336 миллионов Рублей), его срок окупаемости зависит от тарифа на электроэнергию и составит 2,4 года при тарифе 2,2 рубля за кВт·ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка показателей энергогенерирующей станции с низкокипящим рабочим телом в условиях угольной шахты / А. Б. Бирюков [и др.] // Вестник ИГЭУ. – 2018. – № 4. – С. 12-19.
2. Пути использования низкопотенциальных возобновляемых источников энергии и вторичных энергоресурсов угольных шахт / А. Б. Бирюков [и др.] // Вестник МЭИ. – 2018. – № 5. – С. 24-33.
3. Бирюков А. Б. Оценка эффективности энергогенерирующей станции, утилизирующей вторичную и низкопотенциальную теплоту в условиях угольных шахт, методом термодинамического анализа / А. Б. Бирюков, В. В. Варакута, П. А. Гнийтиев // Вестник ИГЭУ. – 2018. – № 2. – С. 12-20.
4. Air-Conditioning and Refrigeration Database. Primary and Recently-Added Citations / Prepared by James M. Calm for the Air-Conditioning and Refrigeration Technology Institute. USA, 323 p.
5. Гидроэлектростанции. Номенклатура машинного оборудования: ПНСТ 50-2015 IEC/TR 61364 (1999). – Введ. 2015–07–01. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 76 с.

Поступила в редакцию 19.11.2018 г.

TWO-CIRCUIT ENERGY GENERATING STATION WITH VARIABLE PARAMETERS OF THE SECOND CONTOUR WORKING BODY

A. Biryukov, P. Gnitiyev, V. Varakuta

The principle of operation of a two-circuit, power generating station on the basis of heat-engine plants (TMU) with a low-boiling working medium in a coal-mining mine, when using BHT as the primary energy. The thermodynamic cycle and the main energy characteristics of the proposed scheme are analyzed depending on changes in the temperature of atmospheric air.

Keywords: renewable energy sources, secondary energy resources, VNT, underground coal mining, Carnot cycle, efficiency, thermodynamic analysis, energy characteristics, economic indicators, energy generation.

Бирюков Алексей Борисович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: birukov.ttf@gmail.com

Biryukov Alexey

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department «Technical Thermophysics» Donetsk National Technical University, Donetsk DPR, Donetsk.

Гнितिёв Павел Александрович

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической теплофизики ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: paul.gnitiyev@mail.ru

Gnitiyev Pavel

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department «Technical Thermophysics» Donetsk National Technical University, DPR, Donetsk.

Варакута Виктор Владимирович

аспирант кафедры технической теплофизики ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», научный сотрудник ГП НИИВЭ, ДНР, г. Донецк.
E-mail: varakutaviktor@ukr.net

Varakuta Victor

Postgraduate Student, Department of Technical Thermal Physics, Donetsk National Technical University, Researcher, GP NIEV, DPR, Donetsk.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА



УДК 532.5/.13

СНИЖЕНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТРЕНИЯ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ СМЕСЕЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИ-АКТИВНЫХ ПОЛИМЕРОВ И ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

© 2018 *А.П. Симоненко, П.В. Асланов, Н.А. Дмитренко*

Одним из наиболее эффективных способов снижения гидродинамического сопротивления турбулентного течения (ГСТТ) является способ, в основе которого лежит введение в турбулентные потоки жидкостей гидродинамически-активных добавок (ГДАД) – высокомолекулярных полимеров (ВП) с линейной структурой макромолекул, некоторых мицеллообразующих поверхностно-активных веществ (МПАВ) и ассиметричных твердых частиц (АТЧ).

В представленной статье систематизированы основные закономерности снижения ГСТТ добавками ВП и МПАВ, приведены результаты экспериментальных исследований турбулентных течений растворов этих веществ и их смесей в трубах и в зазоре между коаксиальными цилиндрами. В работе также приведены результаты экспериментального исследования по влиянию добавок смеси «поверхностно-активное вещество – высокомолекулярный полимер» на профиль скорости и продольную составляющую пульсаций скорости при турбулентном течении воды в трубе.

Полученные результаты позволяют эффективно использовать гидродинамически-активные добавки на практике и углубляют физические истолкования механизма их воздействия на турбулентность в напорных потоках жидкостей в трубах и проточных частях гидравлических машин.

Ключевые слова: снижение турбулентного трения; водные растворы смеси; высокомолекулярный полимер; поверхностно-активные вещества; коэффициент гидродинамического сопротивления; профиль скорости; пульсации скорости.

Состояние проблемы. Разработка методов снижения гидродинамического сопротивления трения являлась важнейшей задачей с первых дней существования науки о движении жидкостей. В настоящее время (в связи с созданием и эксплуатацией магистральных трубопроводов, совершенствованием энергетических машин, увеличением скоростей движения морских объектов, снижением гидродинамического сопротивления турбулентного течения (ГСТТ) становится одной из важнейших научно-технических проблем.

Среди ряда известных методов снижения ГСТТ, таких как отсос и сдвиг пограничного слоя, колебание обтекаемой поверхности с определёнными частотами и амплитудами и др., в последние годы большое распространение получил метод введения в турбулентный поток добавок высокомолекулярных полимеров (ВП) с линейной структурой макромолекул и некоторых мицеллообразующих поверхностно-активных веществ (МПАВ) [1].

Из известных гидродинамически-активных добавок (ГДАД) наибольшей эффективностью, при малых концентрациях в растворах, обладают водорастворимые синтетические и природные полимеры – полиэтиленоксид (ПЭО), полиакриламид (ПАА), гуаровая смола (ГС) и др. [2-6].

Так, например, многочисленными исследованиями однородных водных растворов ПЭО и ПАА, а также растворов из композиций на их основе показана возможность снизить гидравлические потери в напорных трубопроводах на 50...80 %. Это открывает перспективы повышения эффективности работы различных гидравлических систем. При концентрации этих полимеров в однородных растворах равной $10^{-5}...10^{-2}$ вес. % повысить эффективность можно по одному из показателей: либо увеличить длину прямолинейных участков трубопровода в 2,0...5,0 раз, либо уменьшить внутренний диаметр труб на 13,0...28,0%, либо увеличить расход жидкостей по трубопроводу в 1,41...2,24 раза, либо уменьшить затрачиваемую насосами мощность на 50...80%.

Создание на основе ПЭО и ПАА различных водорастворимых полимерных композиций (ВПК) и генераторов приготовления из них растворов открывает широкие перспективы практического использования явления снижения ГСТТ в разомкнутых гидравлических системах – в централизованных и мобильных установках пожаротушения, аварийного водоотведения, повышения эффективности работы гидроструйных машин. Однако из-за механической деструкции макромолекул полимера применение их для снижения ГСТТ в замкнутых системах малоэффективно.

В работе [7] показана возможность эффективного применения МПАВ для повышения эффективности работы замкнутых гидравлических систем некоторых централизованных систем подачи тепла и холода, водокольцевых насосов и т.д. Добавки МПАВ, в отличие от ВП, в однородных растворах обладают обратимой механической деструкцией. Это позволяет использовать этот класс добавок без потери эффективности в магистральных трубопроводах, в которых подача (циркуляция) рабочих жидкостей обеспечивается насосами (например, в системах централизованного тепло- и холодоснабжения).

Анализ основных причин, сдерживающих эффективное применение явления снижения ГСТТ в промышленных масштабах показал, что одной из них является отсутствие у потенциальных потребителей достаточных знаний по закономерностям эффекта Томса и влиянию различных факторов на его величину.

Цель работы заключается в уточнении и дополнении основных закономерностей снижения ГСТТ в водных растворах ВП и МПАВ, а также в получении исходных данных к составлению таких закономерностей в растворах смесей на их основе.

Основные закономерности снижения ГСТТ добавками полимеров. Наиболее полные данные о влиянии высокомолекулярных полимеров на сопротивление турбулентного трения получены в работе [8] путем изучения течений их однородных растворов в трубах.

К основным из них следует отнести следующие:

а) при ламинарном течении в гладких и шероховатых трубах введение полимеров не оказывает влияния на сопротивление трения; полимерные растворы ведут себя подобно ньютоновской жидкости, не вызывая изменений в известных закономерностях сопротивления, при этом практически не меняется величина критического числа Рейнольдса, характеризующего переход течения из ламинарного в турбулентный режим [5];

б) в турбулентном режиме течения снижение гидродинамического сопротивления трения наступает лишь при достижении некоторого порогового числа Рейнольдса ($Re_{пор}$), при котором касательное напряжение трения на стенке трубы достигает порогового значения; это значение зависит от природы полимера и его концентрации в растворе [5, 6];

в) максимальное снижение сопротивления турбулентного трения наблюдается при достижении некоторой оптимальной концентрации полимера в растворе; дальнейшее ее увеличение приводит к снижению величины эффекта [9];

г) для каждого числа Re в гладких и шероховатых трубах существуют предельные значения местных коэффициентов сопротивления турбулентного трения, с уменьшением которых в полимерных растворах не удастся снизить гидродинамическое сопротивление. Этим предельным значениям соответствует «асимптотический» профиль распределения скоростей с протяженной переходной областью. Предельно-допустимое минимальное гидродинамическое сопротивление турбулентного трения в трубах, за счет введения микродобавок высокомолекулярных полимеров, описывается асимптотой Вирка:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 9,21g (Re\sqrt{\lambda}) - 19,6,$$

где λ – коэффициент гидродинамического сопротивления трения; g – ускорение свободного падения [5];

д) в шероховатых трубах значительное снижение величины ГСТТ в растворах полимеров наблюдается лишь в ограниченной области чисел Re ; при дальнейшем их увеличении эффективность воздействия полимерных добавок уменьшается [10];

е) под действием больших гидродинамических напряжений макромолекулы полимера в потоке склонны к деструкции (разрушению), что первоначально приводит к уменьшению величины эффекта снижения сопротивления, а в дальнейшем и к его полному исчезновению [11, 12];

ж) в турбулентных потоках жидкости макромолекулы гидродинамически-активных полимеров, наряду с механической деструкцией, подвергаются окислительной деструкции, которая снижает величину эффекта снижения турбулентного трения;

з) зависимость величины эффекта Томса от концентрации полимера носит экстремальный характер; при этом максимальный эффект достигается при некоторой оптимальной его концентрации в растворе C_{opt} . При $C < C_{opt}$ вязкость полимерного раствора равна или незначительно превышает вязкость растворителя. При $C > C_{opt}$ величина гидродинамического эффекта уменьшается за счет увеличения вязкости раствора [6, 12];

и) при заданной величине перепада давления ΔP (т.е. при фиксированном значении динамической скорости $V = \sqrt{\tau_w/\rho}$, где τ_w – касательное напряжение трения на стенке, ρ – плотность раствора) величина эффекта снижения зависит не только от концентрации полимера, но и от его средней молекулярной массы;

к) большей эффективностью снижать ГСТТ обладают полимеры, макромолекулы которых имеют повышенную гибкость в растворах. Так, например, более гибкие макромолекулы ПЭО эффективнее жестких макромолекул ПАА при их равных молекулярных массах [5, 6, 12].

Для понимания физической природы явления снижения ГСТТ и построения рациональных схем расчета турбулентных потоков жидкостей с добавками гидродинамически-активных ВП необходимо знать особенности их влияния на структуру турбулентности вблизи омываемой стенки, где в основном сосредоточены турбулентная энергия и ее диссипация.

Основное влияние добавок полимеров заключается в утолщении пристенной области течения, которая включает вязкий подслои и переходную зону, а также в уменьшении относительных размеров турбулентного ядра. Кроме этого, происходит

уменьшение (по сравнению с течением воды) интенсивности пульсационных составляющих скорости.

При течении полимерных растворов происходит уменьшение диссипации турбулентной энергии и увеличение колмогоровского масштаба турбулентности. Плотность потока кинетической энергии по сечению трубы при этом уменьшается, что является причиной уменьшения количества переданной энергии от осредненного движения к пульсационному.

Основные закономерности снижения ГСТТ в растворах МПАВ. Из анализа литературных данных следует, что, несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные работы, посвященные снижению турбулентного трения добавками МПАВ, эта проблема еще далека от окончательного решения. Многие вопросы, связанные с этой проблемой, остаются мало изученными, а некоторые практически не исследованы. К ним, в первую очередь, следует отнести вопросы, связанные с влиянием добавок ПАВ на турбулентную структуру потоков и выяснением механизма снижения турбулентного трения в мицеллярных растворах.

В работе [13] авторами настоящей статьи получены данные по влиянию гидродинамически-активных МПАВ на сопротивление турбулентного трения путём изучения течений их мицеллярных растворов в трубах.

К основным из них следует отнести следующие:

а) при ламинарном режиме течения в гладкой и шероховатой трубах введение добавок МПАВ, с концентрациями в растворе выше второй критической концентрации мецеллообразования (KKM_2), приводит к увеличению коэффициента гидродинамического сопротивления турбулентного трения (для случаев расчёта числа Рейнольдса (Re) по вязкости воды) и не влияет на его величину, когда число Re рассчитывается по соответствующей вязкости раствора;

б) под воздействием больших гидродинамических напряжений анизометрические мицеллы МПАВ в потоке подвергаются механической деструкции (разрушению), что первоначально приводит к уменьшению величины эффекта снижения сопротивления, а в дальнейшем и к его полному исчезновению [14]; при уменьшении напряжения трения растворы МПАВ полностью восстанавливают свою гидродинамическую эффективность;

в) зависимость величины эффекта снижения ГСТТ от концентрации МПАВ в растворе носит экстремальный характер; при этом максимальный эффект достигается при некоторой его оптимальной концентрации в растворе C_{opt} ; при $C < C_{opt}$ вязкость раствора МПАВ равна или незначительно превышает вязкость растворителя, при $C > C_{opt}$ величина гидродинамического эффекта уменьшается за счёт увеличения вязкости раствора [14, 15];

г) в шероховатых трубах значительное снижение величины ГСТТ в растворах МПАВ наблюдается лишь в ограниченной области чисел Re ; при дальнейшем их увеличении эффективность воздействия добавок уменьшается;

д) для каждого числа Re , в гладких и шероховатых трубах, существуют предельные значения местных коэффициентов сопротивления турбулентного трения, ниже которых в растворах МПАВ снизить гидродинамическое сопротивление не удаётся; этим предельным значениям соответствует «асимптотический» профиль распределения скоростей с протяжённой переходной областью; предельно-допустимое минимальное гидродинамическое сопротивление трения в трубах, за счёт введения добавок МПАВ, описывается асимптотами; для случаев, когда число Re рассчитывается по вязкости растворителя (воды) в гладких трубах зависимость коэффициента

гидродинамического сопротивления трения λ от числа Рейнольдса Re , при максимальном снижении ГСТТ, имеет вид:

$$1/\sqrt{\lambda} = 9,85 \cdot \lg(Re\sqrt{\lambda}) - 22,1.$$

В то же время, когда числа Re рассчитываются по соответствующей каждому сдвиговому напряжению трения вязкости раствора МПАВ (Re_p), зависимость приобретает вид:

$$1/\sqrt{\lambda} = 8,51 \cdot \lg(Re_p\sqrt{\lambda}) - 13,5;$$

е) снижение гидродинамического сопротивления турбулентного трения в напорных трубопроводах сопровождается уменьшением пульсаций давления в турбулентных потоках растворов МПАВ и вибраций труб.

На величину эффекта снижения ГСТТ существенное влияние оказывают температура и солёность растворов.

Специальными исследованиями, на примере натриевых солей лауриновой, миристиновой, пальмитиновой и стеариновой кислот, установлена температурная область проявления эффекта снижения ГСТТ, которая находится между кривой, соединяющей соответствующие для используемых МПАВ точки Крафта и кривой для верхних температур, при которых начинают разрушаться анизометрические мицеллы.

Зависимость величины эффекта снижения ГСТТ в растворах анионоактивных МПАВ от концентрации электролитов носит экстремальный характер. При этом, на первой стадии добавки электролитов способствуют образованию анизометрических мицелл, уменьшая ККМ₂; дальнейшее увеличение концентрации солей в растворе приводит к высаливанию МПАВ, которое сопровождается полной потерей раствором свойства обладать сниженным гидродинамическим сопротивлением.

Анионоактивные МПАВ эффективно снижают гидродинамическое сопротивление в щелочных средах. В то же время катионоактивные МПАВ имеют наибольшую эффективность в кислых средах. Амфолитные МПАВ эффективны в нейтральных, кислых и щелочных средах.

Гидродинамическое сопротивление трения. При исследовании турбулентного течения жидкости одной из наиболее важных его характеристик является зависимость коэффициента гидродинамического сопротивления трения λ от числа Рейнольдса: $\lambda = \lambda(Re)$. Для течений растворов поверхностно-активных веществ возможны два подхода при построении графиков $\lambda = \lambda(Re)$. Принципиальное отличие этих подходов проявляется при выборе вязкости в числе Рейнольдса.

На рис. 1 а, б представлены результаты экспериментов в виде зависимости $\lambda = \lambda(Re)$ для воды и трёх концентраций водно-солевых растворов метаупона. Измерения были проведены на турбореометре с использованием трубки диаметром 2,66 мм. В качестве добавки электролита использовался хлористый натрий с концентрацией в растворе равной 6,8% вес. Числа Рейнольдса рассчитывались по вязкости воды (рис. 1, а) и вязкости раствора метаупона (рис. 1, б), которая определялась из зависимости напряжения трения на стенке τ_w от градиента средней скорости γ .

Из приведенных зависимостей $\lambda = \lambda(Re)$ (рис. 1, а) видно, что в ламинарном режиме движения коэффициент гидродинамического сопротивления в растворах метаупона выше коэффициента сопротивления растворителя (воды). Для каждой из концентраций можно определить некоторое пороговое число Рейнольдса $Re_{пор}$, построенное по вязкости воды, выше которого начинает проявляться эффект снижения гидродинамического сопротивления. При этом с увеличением концентрации метаупона $Re_{пор}$ смещается в сторону больших значений. Коэффициент сопротивления λ достигает

минимального значения при некотором определенном числе Рейнольдса Re_{min} (для заданной концентрации добавки). При $Re > Re_{min}$ сопротивление начинает возрастать и кривая для коэффициента сопротивления $\lambda = \lambda(Re)$ выходит на соответствующую кривую для растворителя (воды). Этот выход хорошо зафиксирован для раствора метаупона с концентрацией $C = 0,2\%$ вес.

Установленная зависимость $\lambda = \lambda(Re)$ позволяет предположить, что при больших числах Рейнольдса происходит разрушение анизометрических мицеллярных структур до сферических мицелл Гартли.

При определении величины действительного (технического) эффекта снижения сопротивления целесообразно рассматривать зависимости коэффициента сопротивления λ от чисел Re , построенных по вязкости воды. Тогда при заданном $Re = const$ по графику $\lambda = \lambda(Re)$ можно рассчитать величину действительного эффекта, которая является наиболее важной характеристикой для технических приложений.

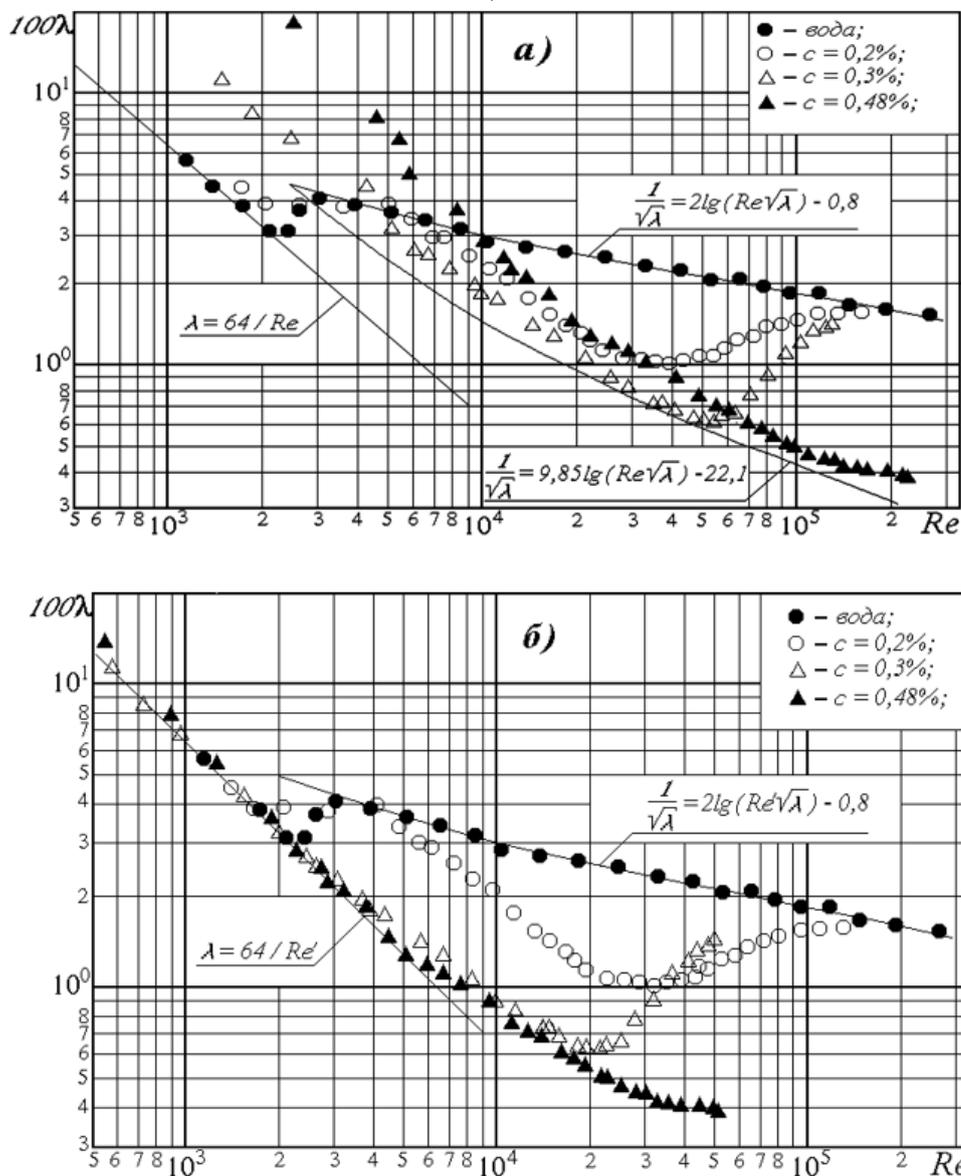


Рис. 1 а, б. Зависимость величины коэффициента гидродинамического сопротивления трения λ от числа Рейнольдса, рассчитанных по вязкости воды (а) и от чисел Рейнольдса, рассчитанных по вязкости водно-солевых (содержание хлористого натрия 6,8% вес.) растворов метаупона. Данные работы [16].

Использование при построении зависимости $\lambda = \lambda(Re)$ чисел Рейнольдса, рассчитанных по вязкости растворов ПАВ, считается целесообразным при изучении физической природы эффекта. Такое представление опытных данных позволяет, в частности, сделать вывод о ламинаризирующем действии добавок ПАВ на течение в целом. Кроме этого, в дальнейшем оно может быть использовано при нахождении предельной асимптоты для коэффициента гидродинамического сопротивления трения растворов МПАВ.

Деструкция в мицеллярных растворах. Экспериментальные исследования механической деструкции в растворах МПАВ проводили на гидродинамическом стенде, представляющем собой замкнутый контур общей длиной 130 м, собранный из стальных труб с естественной шероховатостью, диаметром 95 мм, и включающем следующие элементы: бак с исследуемой жидкостью, центробежный насос, теплообменники. Расход жидкости изменялся с помощью задвижки, установленной на выходе из насоса. Потери давления на прямолинейных участках и в системе в целом определяли с помощью дифференциальных и образцового манометров.

На рис. 2 а, б приведены результаты исследования механической деструкции при различных температурах в водном растворе метаупона с концентрацией $C = 1,85\%$ вес.

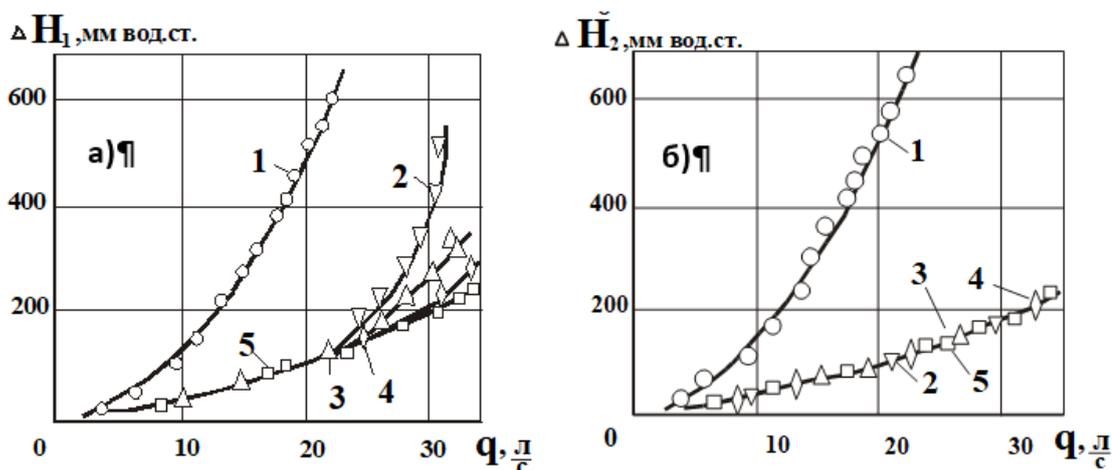


Рис. 2. а, б. Зависимость потерь напора ΔH_1 , ΔH_2 на прямых участках трубы диаметром 95 мм и длиной 5 м, расположенных от насоса на расстоянии 23 м (а) и 95 м (б) от расхода водно-солевого раствора метаупона q , л/с. Концентрация метаупона и хлористого натрия в растворе 1,85% вес. и 7,8% вес. соответственно.

1 – вода, кривые 2,3,4,5 – температура растворов 2,3; 3,5; 11,0 и 13,0°C. Данные работы [16].

По оси абсцисс отложен расход жидкости q по оси ординат – потери напора ΔH_1 и ΔH_2 , измеренные на участках длиной 5 м на расстоянии 23 м и 95 м от выхода из насоса, соответственно. Видно, что при данной концентрации метаупона, которая значительно превышает оптимальную, гидродинамическая эффективность раствора на расстоянии 95 м от насоса практически не зависит от температуры (все экспериментальные точки группируются возле одной кривой). Следует также отметить, что скорость восстановления мицеллярных структур при расходах $q < 20$ л/с не зависит от температуры раствора. При $q > 20$ л/с скорость восстановления мицелл уменьшается при понижении температуры, что и приводит к расслоению экспериментальных кривых $\Delta H_1 = \Delta H_1(q)$.

В работе [17] приведены результаты экспериментальных исследований по определению зависимости коэффициента момента гидродинамического сопротивления

трения C_m от числа Рейнольдса Re при течении водно-солевых растворов гидродинамически-активных промышленных паст – диталана OTS и метаупона в зазоре между коаксиальными цилиндрами, т.е. в условиях, позволяющих в течение длительного времени поддерживать определенные напряжения трения на стенке вращающегося цилиндра. При этом в качестве электролита – способствующего мицеллообразованию в растворах поверхностно-активных веществ был использован хлористый натрий, содержание которого в растворах диталана OTS и метаупона было равно 3,0% вес. и 8,0% вес. соответственно.

Экспериментальные исследования проводились на установке, представляющей собой стакан из нержавеющей стали, который посредством электродвигателя постоянного тока приводился во вращение с возможностью проводить измерения при выбранных (фиксированных) числах оборотов. Внутри стакана на расстоянии 1 мм друг от друга были установлены три цилиндра. Верхний и нижний цилиндры устанавливаются неподвижно с целью устранения краевых эффектов. Средний цилиндр может поворачиваться на 120° , а возникающий на нем в результате вращения внешнего цилиндра момент M передается на датчик силы, по показателям которого рассчитывалась величина коэффициента момента сопротивления C_m по формуле:

$$C_m = \frac{\tau}{\rho \vartheta^2} = \frac{M}{\rho \omega^2} \cdot \frac{1}{2\pi R^4 H}.$$

Здесь τ – напряжение трения на среднем цилиндре н/м^2 , ϑ – скорость вращения наружного цилиндра (стакана), м/с ; ρ – плотность исследуемой жидкости, кг/м^3 ; ω – частота вращения цилиндра, с^{-1} ; H – высота среднего (неподвижного) цилиндра; R – внутренний радиус вращающегося цилиндра.

Число Рейнольдса определялось из соотношения:

$$Re = \frac{\vartheta \delta}{\nu} = \omega R \cdot \delta / \nu,$$

где δ – зазор между неподвижными и вращающимися цилиндрами, м ; ν – вязкость исследуемой жидкости.

На рис. 3 в качестве примера приведены зависимости коэффициента момента сопротивления от числа Re , рассчитанного по вязкости воды для растворов диталана OTS разных концентраций в 3%-ом водном растворе хлористого натрия.

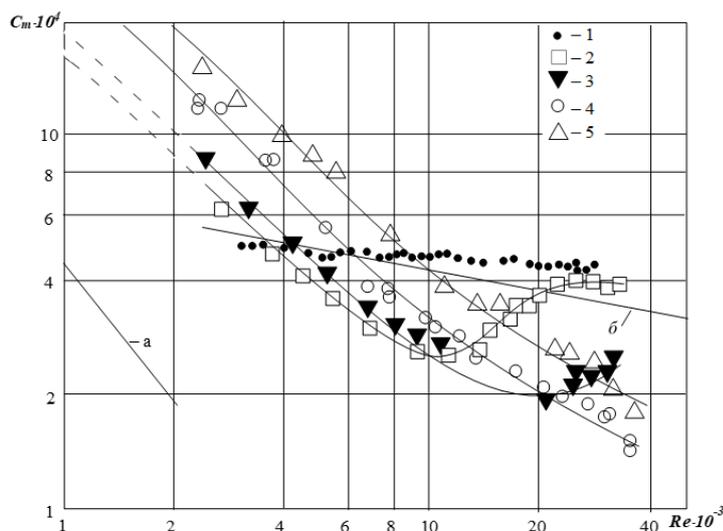


Рис. 3. Зависимость коэффициента момента гидродинамического сопротивления трения от числа Рейнольдса для воды – кривая 1, и водных растворов, содержащих 0,3; 0,6; 1,2; 2,4%, вес. диталана OTS (кривые 2÷5 соответственно). Концентрация хлористого натрия в 2÷5 – 3%, вес. Данные работы [17]

Кривые a и b соответствуют зависимости $C_m = f(Re)$ при течении воды в зазоре между коаксиальными цилиндрами относительной ширины $\delta/R = 0.028$, полученной Дж. И. Тейлором (см. ссылку в работе [18]). Видно, что коэффициент момента сопротивления для растворов концентрации $C = 1.2; 2.4\%$ (кривые 4 и 5 соответственно) снижение сопротивления начинает проявляться при числах Рейнольдса 6000 и 9000. Однако эти растворы, в отличие от растворов, содержащих 0,3 и 0,6% вес. диталана OTS, обладают сниженным ГСТТ при значительно больших сдвиговых напряжениях (числах Re).

Аналогичные исследования были проведены с растворами метаупона. Характер кривых зависимости $C_m = f(Re)$ для его водных растворов такой же, как и для диталана OTS. Однако добавки метаупона более эффективны при больших сдвиговых напряжениях. Это позволяет предположить, что структурно-механические свойства растворов ПАВ, а, следовательно, и их гидродинамическая эффективность существенно зависят не только от концентрации вводимой добавки, но и от строения углеводородного радикала молекулы поверхностно-активного вещества.

Снижение ГСТТ в растворах смесей полимеров и ПАВ. Авторами работы [19] проведены экспериментальные исследования по влиянию концентрации анионных ПАВ на величину эффекта снижения гидродинамического сопротивления в водных растворах ПЭО и ПАА, а также стабильность (устойчивость к механической деструкции) растворов этих полимеров в турбулентном потоке.

В качестве поверхностно-активных веществ были использованы ПАВ «Прогресс» марки 20, содержащим 20% натриевой соли вторичных алкилсульфатов и натрия додецилсульфат (НДДС) марки «Ч».

Результаты экспериментальных исследований показали, что введение в водный раствор ПЭО 3%, вес. ПАВ «Прогресс» (соответствует содержанию этого вещества в системах пенного пожаротушения) приводит к повышению гидродинамической эффективности полимерных растворов во всем диапазоне чисел Рейнольдса. При этом величина критического числа Re смещается в сторону меньших значений.

В растворах смеси гидролизованного ПАА (со степенью гидролиза 16%) и ПАВ «Прогресс» коэффициент гидродинамического сопротивления трения больше, чем у раствора полимера без ПАВ.

На основании полученных результатов, с учетом степени ионизации и ξ – потенциала мицелл, можно сделать вывод, что повышенной гидродинамической эффективности обладают гидрофобные комплексы ПЭО с мицеллами ПАВ.

Кроме этого, следует отметить, что добавки анионных ПАВ, в количестве, равном или больше первой критической концентрации мицеллообразования (KKM_1), увеличивают гидродинамическую эффективность ПЭО и уменьшают эффективность гидролизованного ПАА примерно на 10%. В растворах негидролизованного ПАА величина эффекта снижения турбулентного трения не зависит от концентрации ПАВ.

Анионные ПАВ повышают устойчивость растворов ПЭО и негидролизованного ПАА к механической деструкции и не влияют на стабильность растворов гидролизованного ПАА.

В работе [20] приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию смесей гидродинамически-активных высокомолекулярного полимера – ПАА и МПАВ – промышленной пасты метаупон на величину снижения коэффициента момента ГСТТ в зазоре между коаксиальными цилиндрами. Исследования проводились в широких диапазонах концентраций ПАА и метаупона в смеси, при числах Рейнольдса от 6000 до 40000.

В ходе проведения экспериментальных исследований установлены особенности снижения ГСТТ в смесях, к которым в первую очередь следует отнести расширение температурного диапазона и диапазона чисел Рейнольдса, в которых проявляется эффект. При этом следует отметить, что в растворах смеси, содержащих МПАВ (метаупон) с концентрациями выше второй критической концентрации мицеллообразования (KKM_2), в значительной мере уменьшается механическая деструкция макромолекул ПАА.

На рис. 4 в качестве примера приведены кривые зависимости коэффициента момента гидродинамического сопротивления от числа Рейнольдса для воды, водных растворов ПАА, метаупона и смеси «ПАА+метаупон». С целью уменьшения KKM_2 в растворы, содержащие метаупон, дополнительно вводился хлористый натрий – 6,8% вес.

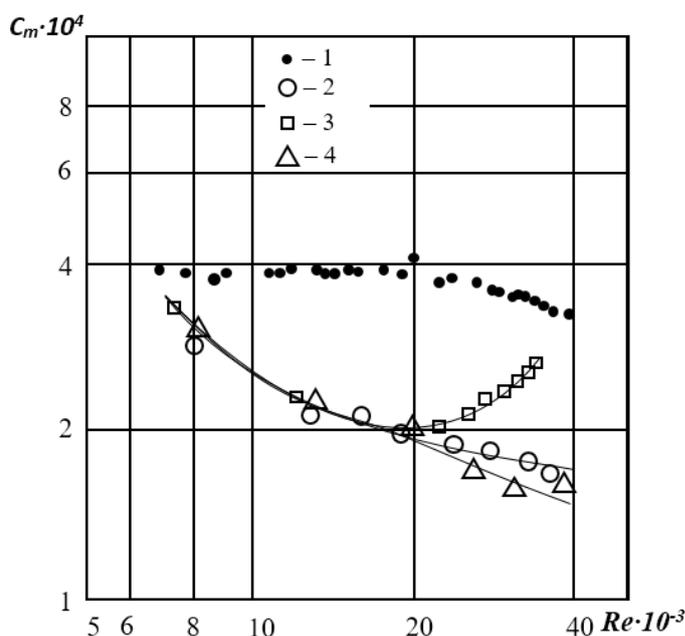


Рис. 4. Зависимость коэффициента момента гидродинамического сопротивления трения от числа Рейнольдса для воды – кривая 1, водного 10^{-4} г/см³ раствора ПАА – кривая 2; водного 0,3% вес. метаупона – кривая 3; смеси «ПАА-метаупон» – кривая 4. Концентрация хлористого натрия в 3,4÷6,8% вес. Данные работы [20].

Профили скорости и интенсивности турбулентности. Измерения полей скоростей и среднеквадратичных значений продольной составляющей пульсаций скорости, проводили на гидродинамическом стенде замкнутого типа с применением однокомпонентного лазерного измерителя скорости. Турбулентное течение исследуемых жидкостей реализовывалось в изготовленном из оргстекла рабочем канале квадратного сечения со стороной 0,04 м. Сечение, в котором проводили измерения полей скоростей, находилось на расстоянии 100 калибров от входа в канал. В качестве ГДАД использовали: полимер – высокомолекулярный полиакриламид и поверхностно-активное вещество – техническую пасту «метаупон».

Исследования проводили в следующей последовательности. Первоначально были проведены измерения при течении в канале раствора метаупона (МУ) концентрацией 0,2%, содержащего 7% вес. хлористого натрия. На втором этапе были проведены исследования течения раствора полиакриламида (ПАА) концентрации 0,009%. При рабочей расходной скорости раствор полимера циркулировал до стабилизации его

гидродинамической эффективности. В начале опыта эффект снижения турбулентного трения был близок к 80%. Через некоторое время, вследствие деструкции макромолекул полимера, эффективность раствора снизилась до 20-25% и в дальнейшем, при проведении исследований оставалась постоянной. После этого были проведены измерения профиля скорости и интенсивности продольных пульсаций скорости. Для этого в раствор полимера был введён метаупон до концентрации 0,2% вес. и хлористый натрий (концентрация 7% вес.). Все измерения проводились при постоянной расходной скорости, которой соответствовало число Рейнольдса равное 26000, и температуре растворов 20°C. В процессе проведения измерений значения величин снижения гидродинамического сопротивления трения составляли: $(\Delta\lambda/\lambda)_{\text{ПАА}} = 22\%$ для течения раствора полиакриламида, $(\Delta\lambda/\lambda)_{\text{МУ}} = 37\%$ для течения раствора метаупона, а для течения раствора смеси этих веществ $(\Delta\lambda/\lambda)_{\text{смесь}} = 70\%$.

На рис. 5 представлены профили скорости для течения воды, раствора ПАА, метаупона и их смеси.

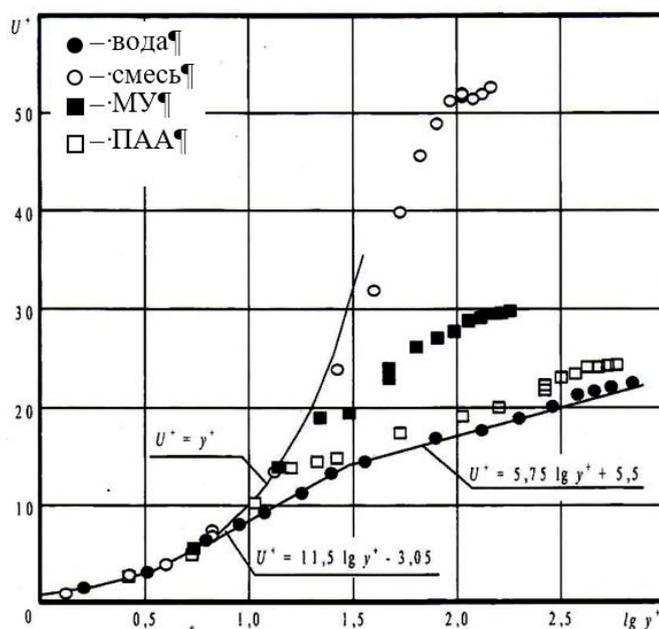


Рис. 5. Профили скорости для течения воды, растворов ПАА, метаупона и их смеси [21].

В турбулентном ядре для всех трех исследованных течений профиль скорости можно описать логарифмической формулой $U^+ = A \cdot \lg y^+ + B$, где коэффициент A определялся наклоном зависимости U^+ от y^+ . Значение коэффициента A при течениях растворов ПАВ увеличивается. Этот результат для растворов поверхностно-активных веществ согласуется с результатами других исследований [5]. Для течения растворов полимеров изменение значения коэффициента A , по сравнению с его значением для течения ньютоновских жидкостей, до сих пор является спорным – отмечены как его увеличение, так и равенство значению при течениях ньютоновской жидкости. Для течения раствора смеси «полиакриламид-метаупон» измерения показали, что зона турбулентного ядра занимает много меньшую, по сравнению с течениями однородных растворов, часть сечения потока, а значение коэффициента A осталось, в пределах погрешности эксперимента, таким же, как и при течениях чистого растворителя.

На рис. 6 представлены распределения по сечению потока среднеквадратичных значений продольных пульсаций скорости, нормированных по динамической скорости

U^* . Считается [5], что при течении растворов полимеров максимальная величина среднеквадратичных значений продольных пульсаций, по крайней мере, не меньше соответствующих при течении ньютоновской жидкости. Авторами работы [21] установлено, что максимальные среднеквадратичные значения продольных пульсаций скорости при течении растворов полимера или метаупона каждого по отдельности, меньше соответствующих значений для течения чистого растворителя – воды. Однако следует отметить, что при течении раствора полимера наибольшее значение продольных пульсаций скорости несколько больше чем при течении раствора метаупона. В остальном распределения этих величин для течения растворов полимера и ПАВ имеют традиционный для них характер – сдвиг максимума пульсаций на большее расстояние от стенки и размывание по сечению потока зоны, в которой наблюдаются наибольшие значения продольных пульсаций скорости. В области турбулентного ядра добавки полимеров и ПАВ не влияют на величину среднеквадратичных значений продольных пульсаций скорости.

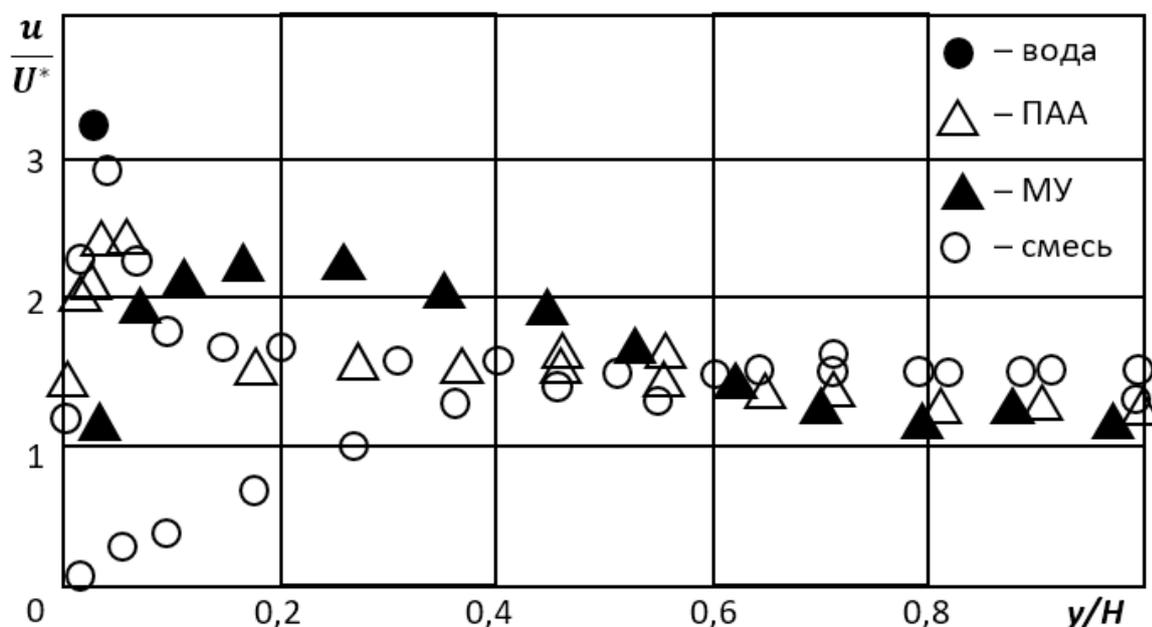


Рис. 6. Распределения по сечению потока среднеквадратичных значений продольных пульсаций скорости, нормированных по динамической скорости U^* . Данные работы [21].

В случае течения раствора смеси «полиакриламид-метаупон» это распределение среднеквадратичных значений пульсаций носит иной характер. В этом случае происходит очень сильное снижение продольных пульсаций, особенно в пристенной области течения. Максимум продольных пульсаций скорости в этом случае выражен очень слабо и отодвинут от стенки в центральную зону течения.

Столь сильное уменьшение продольных пульсаций скорости позволяет высказать предположение о том, что в растворе смеси «полимер-ПАВ» происходит объединение в пространственные структуры макромолекул полимера и мицелл поверхностно-активного вещества, которые являются более устойчивыми к воздействию гидродинамического поля, чем пространственные структуры, возникающие в растворах составных компонентов смеси по отдельности.

Выводы:

1. Повышение гидродинамической эффективности в водных растворах смеси ПЭО и анионных ПАВ обеспечивается за счёт образования гидрофобных комплексов из макромолекул полимера с мицеллами ПАВ.
2. Добавки анионных ПАВ, в количествах равных или больше первой критической концентрации мицеллообразования (KMM_1), увеличивают гидродинамическую эффективность ПЭО и уменьшают эффективность гидролизованного ПАА в водных растворах примерно на 10%.
3. Анионные ПАВ повышают устойчивость растворов ПЭО и негидролизованного ПАА к механической деструкции и не влияют на стабильность растворов гидролизованного ПАА.
4. Добавки смеси «полимер-МПАВ» приводят к существенному перераспределению осредненной и пульсационной скоростей, что воздействует на турбулентность потока в значительно большей степени, чем полимеры или поверхностно-активные вещества в отдельности друг от друга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повх И. Л. Техническая гидромеханика / И. Л. Повх. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1976. – 504 с.
2. Liberman M. W. Shear-induced structure formation in solutions of drag reducing polymers / M. W. Liberman, E. J. Pollauf, A. J. J. McHugh // *Non-Newton. Fluid Mech.* – 2003. – Vol. 113, No. 2-3. – P. 193-208.
3. Корнилов В. И. Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) / В. И. Корнилов // *Теплофизика и аэромеханика.* – Т. 12, № 2. – 2005. – С. 183-208.
4. Козлов Л. П. Гідродинамічний ефект Томса і його можливі технічні застосування / Л. П. Козлов // *Вісник АН УРСР.* – 1987. – № 1. – С. 23-33.
5. Пилипенко В. Н. Влияние добавок на пристенные турбулентные течения / В. Н. Пилипенко // *Итоги науки и техники ВИНТИ. Механика жидкости и газа.* – 1980. – Т. 15. – С. 156-257.
6. О снижении гидродинамического сопротивления добавками полимеров / Л. И. Седов [и др.] // *Механика турбулентных потоков : сборник.* – Москва, 1980. – С. 7-28.
7. Особенности турбулентных течений растворов мицеллообразующих поверхностно-активных веществ / И. Л. Повх [и др.] // *Механика турбулентных потоков : сборник.* – Москва, 1980. – С. 44-69.
8. Основные закономерности эффекта Томса и влияние различных факторов на его величину / А. П. Симоненко [и др.] // *Вестник Автомобильно-дорожного института ДонНТУ.* – Донецк, 2016. – № 2 (19). – С. 66-73.
9. Хойт Д. У. Влияние добавок на сопротивление трения в жидкости / Д. У. Хойт // *Труды американского общества инженеров-механиков. Серия D: Теоретические основы инженерных расчётов.* – Москва, 1971. – № 2. – С. 1-31.
10. Иванюта Ю. Ф. Турбулентные трения растворов полиокса в трубе с большой шероховатостью / Ю. Ф. Иванюта, Л. А. Чекалова // *Инженерно-физический журнал.* – Т. 31, № 2. – 1976. – С. 225-230.
11. Неронова И. А. Деструкция полиэксетиленов и её связь со снижением сопротивления трения в турбулентном потоке / И. А. Неронова // *Механика турбулентных потоков : сборник.* – Москва, 1980. – С. 364-368.
12. Анисимов И. А. Зависимость деструкции водного раствора полиэтиленоксида от работы сил трения / И. А. Анисимов, Б. П. Миронов // *Турбулентные сдвиговые течения неньютоновских жидкостей : сборник.* – Новосибирск, 1981. – С. 14-38.
13. Симоненко А. П. Основные закономерности снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения в растворах мицеллообразующих поверхностно-активных веществ / А. П. Симоненко, Н. А. Дмитренко, П. В. Асланов // *Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности : материалы I Междунар. науч. конф. (Донецк, 16-18 мая 2016 г.).* – Ростов-на-Дону, 2016. – Т. 1 : Физико-математические, технические науки и экология / под общ. ред. С. В. Беспаловой. – С. 191-194.

14. Повх И. Л. Применение поверхностно-активных веществ для уменьшения турбулентного трения жидкостей в технологических аппаратах / И. Л. Повх, А. Б. Ступин, А. П. Симоненко // Аэродинамика в технологических процессах : [материалы совещания, Жданов, 1978 г.]. – Москва, 1981. – С. 230-240.
15. Применение гидродинамически-активных добавок полимеров и поверхностно-активных веществ в энергосберегающих технологиях / А. Б. Ступин [и др.] // Прикладна гідромеханіка. – 2001. – Т. 3 (75), № 1. – С. 74-81.
16. 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 / Симоненко Александр Петрович. – Донецк, 2012. – 397 с.
17. Симоненко А. П. Турбулентное течение водных растворов мицеллообразующих ПАВ в зазоре между коаксиальными цилиндрами / А. П. Симоненко // Инженерно-физический журнал. – 1980. – Т. XXXVIII, № 2. – С. 231-234.
18. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтин. – Москва : Наука, 1974. – 712 с.
19. Снижение турбулентного трения в водных растворах смесей полимеров и поверхностно-активных веществ / И. Л. Повх [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 1988. – Т. 54, № 5. – С. 759-764.
20. Снижение турбулентного трения в растворах смеси мицеллообразующее ПАВ – полимер / И. Л. Повх [и др.]. – Москва, 1979. – 12 с. – Деп. в ВИНТИ, № 717-79.
21. Ступин А.Б. Исследование турбулентный течений растворов полимера и поверхностно-активного вещества / А. Б. Ступин, П. В. Асланов, В. М. Максимцов // Теоретическая и прикладная механика. – 1998. – № 28. – С. 142-146.

Поступила в редакцию 01.11.2018 г.

REDUCTION OF TURBULENT FRICTION IN AQUEOUS SOLUTIONS OF MIXTURES OF HYDRODYNAMIC-ACTIVE POLYMERS AND SURFACE-ACTIVE SUBSTANCES

A.P. Simonenko, P.V. Aslanov, N.A. Dmitrenko

One of the most effective ways to reduce the hydrodynamic resistance of turbulent friction (HRTF) is a method, which is based on the introduction of hydrodynamically active additives into high-molecular-mass polymers (HMP) with the linear structure of macromolecules, some micelle-forming surface-active substances (MSAS), and asymmetric solid particles.

In the presented article, the main regularities of HRTF reduction by HMP additives (Toms effect) and MSAS additives are systematized, the results of experimental studies of turbulent flows of solutions of these substances in pipes and in the gap between coaxial cylinders are presented. Besides, in article also presents the results of an experimental study on the effect of the “surfactant-high-molecular polymer” mixture on the integral characteristics of the flow, the velocity profile and the longitudinal component of the velocity pulsations during turbulent flow of water in the pipe.

The results obtained make it possible to effectively use hydrodynamically active additives in practice, deepen the physical interpretations of the mechanism of their effect on turbulence in pressure flows of liquids in pipes, and flow parts of hydraulic machines.

Keywords: reduction of turbulent friction; aqueous solutions of mixtures; high molecular weight polymer; surfactants; micelle-forming surface-active substances; coefficient of hydrodynamic resistance; speed profile; ripple speed.

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 Alexander Petrovich

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

Асланов Пётр Васильевич

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,

ДНР, г. Донецк.

E-Mail: aslanov.fnpme@gmail.com

Aslanov Petr Vasilyevich

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

DPR, Donetsk.

Дмитренко Никита Александрович

старший научный сотрудник кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,

ДНР, г. Донецк.

E-Mail: nikita.a.dmitrenko@ya.ru

Dmitrenko Nikita Aleksandrovich

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

E-Mail: nikita.a.dmitrenko@ya.ru

УДК 504.05+504.4

**ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТА ТОМСА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ГИДРОТРАНСПОРТА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ,
КАНАЛИЗАЦИИ И ОТВЕДЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД**

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

В настоящей работе впервые систематизированы результаты экспериментальных исследований по применению явления снижения гидродинамического сопротивления турбулентного трения (ГСТТ) добавками растворимых высокомолекулярных полимеров (эффект Томса) в суспензиях твёрдых частиц (гидротранспорт сыпучих материалов), в глинистых и гипсовых растворах, в сточных водах с различной степенью загрязнённости механическими примесями. Полученные результаты позволяют определить основные требования по применению гидродинамически активных добавок высокомолекулярных полимеров (ВП) и композиций на их основе в гидравлических системах гидротранспорта сыпучих материалов, для увеличения пропускной способности трубопроводов систем канализации и водоотведения. Особое внимание в статье уделено снижению гидравлических потерь при подаче в напорных трубопроводах глинистых и гипсовых растворов.

Ключевые слова: снижение гидравлических потерь, эффект Томса, полиакриламид, полиэтиленоксид, поверхностно-активные вещества, суспензии, взвесенесущие потоки, глинистые и гипсовые растворы, гидротранспорт сыпучих материалов, системы канализации и водоотведения, рекомендации по применению.

Состояние проблемы. Современное развитие гидродинамики характеризуется поиском эффективных способов управления процессами переноса в турбулентных потоках жидкостей. В первую очередь это относится к явлению переноса импульса, т.к. его уменьшение приводит к значительному снижению ГСТТ в напорных трубопроводах, а, следовательно, и к повышению эффективности работы различных гидравлических систем и машин, в том числе к уменьшению потребляемой ими энергии.

Одним из наиболее эффективных способов снижения ГСТТ является способ, в основе которого лежит введение в турбулентные потоки жидкости гидродинамически активных добавок - высокомолекулярных полимеров (ВП), известный в научной литературе как эффект Томса.

Многочисленными экспериментальными исследованиями однородных водных растворов высокомолекулярных полиэтиленоксида (ПЭО) и полиакриламида (ПАА), а также растворов композиции на их основе показана возможность снижения гидравлических потерь в напорных трубопроводах на 50...80 %. Это открывает перспективы повышения эффективности работы различных гидравлических систем (при содержании этих полимеров в растворе $5 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ вес. %) по одному из показателей: либо увеличить длину прямолинейных участков трубопроводов в 2,0...5,0 раз, либо уменьшить внутренний диаметр труб на 13,0...28,0 %, либо увеличить расход жидкости в 1,41...2,24 раза, либо уменьшить затрачиваемую насосами мощность на 50,0...80,0 % [1-9].

В сточных водах с повышенной загрязнённостью механическими примесями столь существенного эффекта снижения достичь не удаётся. По всей видимости это связано с наличием у макромолекул ВП флокулирующей способности - образовывать с механическими примесями флоккулы. При этом концентрация кинетически

независимых макромолекулы уменьшается и, следовательно, уменьшается величина эффекта снижения ГСТТ.

Гидравлические системы гидротранспорта сыпучих материалов, канализации и водоотведения (особенно в аварийный период), которые характеризуются значительной протяженностью трубопроводов, могут стать ярким примером эффективного применения эффекта Томса. К большому сожалению решению этой проблемы посвящено ограниченное число работ, а в ряде случаев приведенные в них результаты противоречивы и не могут быть реализованы на практике.

Постановка задачи. На основе обзора работ по снижению гидродинамического сопротивления трения в потоках жидкостей, содержащих в виде суспензии кварцевый песок, бурый и каменный угли, шлак тепловых электростанций и др., а также по уменьшению гидравлических потерь при подаче глинистых и гипсовых растворов по напорным трубопроводам установить основные закономерности применения гидродинамические активных добавок при гидротранспорте сыпучих материалов, в централизованных системах канализации и при аварийном откачивании сточных вод.

Общие положения снижения ГСТТ добавками ВП.

Основные закономерности эффекта Томса [1,2]. Наиболее полные данные о влиянии высокомолекулярных полимеров на сопротивление трения получены путем изучения течений их однородных растворов в трубах. К основным из них следует отнести следующие:

а) при ламинарном течении в гладкой и шероховатой трубах введение полимеров не оказывает влияния на сопротивление трения; полимерные растворы ведут себя подобно ньютоновской жидкости, не вызывая изменений в известных закономерностях сопротивления, при этом практически не меняется величина критического числа Рейнольдса, отвечающего переходу в турбулентный режим [3];

б) в турбулентном режиме течения снижение гидродинамического сопротивления наступает лишь при достижении некоторого числа Рейнольдса (Re_{nop}), при котором касательное напряжение на стенке трубы достигает порогового значения; это значение зависит от природы полимера и его концентрации в растворе [4];

в) максимальное снижение сопротивления турбулентного трения наблюдается при достижении некоторой оптимальной концентрации полимера в растворе; дальнейшее ее увеличение приводит к снижению величины эффекта [5,6];

г) для каждого числа Re в гладких и шероховатых трубах есть предельные значения местных коэффициентов сопротивления, ниже которых в полимерных растворах снизить сопротивление трения не удастся; этим предельным значениям соответствует «асимптотический» профиль распределения скоростей с протяженной переходной областью; предельно-допустимое минимальное гидродинамическое сопротивление трения в трубах за счет введения микродобавок высокомолекулярных полимеров описывается асимптотой Вирка:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 9,2 \lg(Re\sqrt{\lambda}) - 19,6 \quad (1)$$

д) в шероховатых трубах значительное снижение сопротивления в растворах полимеров наблюдается лишь в ограниченной области чисел Re ; при дальнейшем их увеличении эффективность воздействия полимерных добавок уменьшается [7];

е) под действием больших гидродинамических напряжений макромолекулы полимера в потоке склонны к деструкции (разрушению), что первоначально приводит к

уменьшению величины эффекта снижения сопротивления, а в дальнейшем и к его полному исчезновению [8,9];

ж) в турбулентных потоках макромолекулы гидродинамически-активных полимеров наряду с механической деструкцией подвергаются окислительной деструкции, которая снижает величину эффекта снижения турбулентного трения;

з) зависимость величины эффекта снижения гидродинамического сопротивления трения от концентрации полимера носит экстремальный характер; при этом максимальный эффект достигается при некоторой оптимальной его концентрации в растворе C_{opt} ; при $C < C_{opt}$ вязкость полимерного раствора незначительно превышает вязкость растворителя, при $C > C_{opt}$ величина гидродинамического эффекта уменьшается за счет увеличения вязкости раствора [4,10];

и) при заданной величине перепада давления ΔP (т.е. при фиксированном значении динамической скорости $V = \sqrt{\tau_w/\rho}$, где τ_w – касательное напряжение трения на стенке, ρ – плотность раствора), величина эффекта снижения зависит не только от концентрации полимера, но и от его среднего молекулярного веса;

к) большей эффективностью снижать гидродинамическое сопротивление трения обладают полимеры, макромолекулы которых имеют повышенную гибкость в растворах; так, например, более гибкие макромолекулы ПЭО эффективнее жестких макромолекул ПАА при их равных молекулярных массах [3,11].

Влияние различных факторов на величину снижения ГСТТ [1,2]. В процессе исследований и при практическом использовании эффекта Томса часто приходится сталкиваться с фактами проявления различной гидродинамической активности одними и теми же полимерами в различных 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 [12]:

$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 C}, \quad (2)$$

где η , η_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 η и η_0 .

Согласно Флори [13] характеристическая вязкость связана с размерами макромолекулярного клубка следующим соотношением:

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

где Φ_0 – константа Флори, \bar{h}^2 – среднеквадратичное расстояние между концами полимерной цепи, M – молекулярная масса полимера. В соответствии с приведенным

уравнением можно сделать вывод, что об изменении размеров макромолекулярных клубков можно судить по характеристической вязкости полимерных растворов.

Автором работы [14] проведены комплексные исследования по определению влияния температуры, добавок солей различной природы, а также неэлектролитов на характеристическую вязкость и величину эффекта снижения гидродинамического сопротивления 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, добавок солей и неэлектролитов на структуру воды, которая должна определять величины характеристической вязкости и гидродинамического сопротивления приготовленных на ее основе растворов.

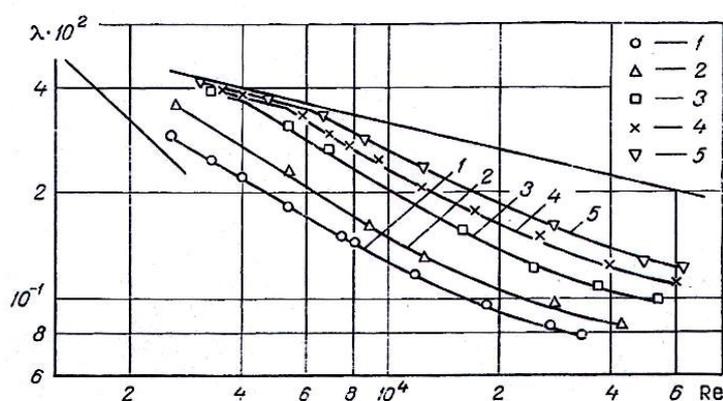


Рис. 1. Зависимость величины коэффициента гидродинамического сопротивления λ от числа Рейнольдса Re при различных температурах. Кривые 1, 2, 3, 4 и 5 соответствуют температуре растворов 18,0; 38,5; 57,0; 66,0 и 75°C. Данные работы [14]

Влияние температуры. На рис. 1. приведена зависимость величины коэффициента гидродинамического сопротивления трения λ 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 λ от числа Re при температуре раствора равной 18°C лежит значительно ниже аналогичной кривой, полученной при температуре 75°C (кривая 5).

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 макромолекулы была проведена автором работы [14] численным моделированием методом Монте-Карло и показано, что водородно-связанные мостики стабилизируют максимально развернутую конформацию макромолекулярной цепи ПЭО в водном растворе.

Влияние концентрации различных солей на величину эффекта снижения гидродинамического сопротивления трения $\Delta\lambda/\lambda$, % представлено на рис. 2. Видно, что на величину эффекта влияние оказывает не только концентрация, но и природа соли.

Электролиты оказывают деструктурирующие действия на воду, т.к. их растворение приводит к разрушению сетки водородных связей в воде точно так же, как и повышение температуры. Поэтому растворение солей и увеличение их содержания в растворе, приводит к свертыванию макромолекулярных цепей ПЭО в водных растворах. Этим и объясняется уменьшение величины $\Delta\lambda/\lambda$, % особенно для сильных электролитов (K_2SO_4 и K_2CO_3 – см. кривые 3 и 4 соответственно) по сравнению со слабым КJ (кривая 1).

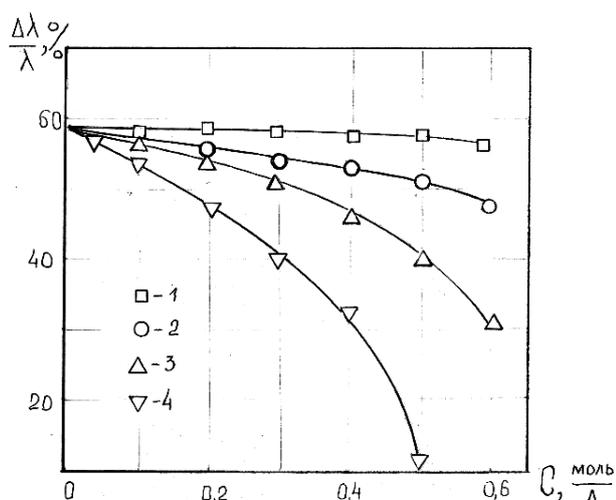


Рис. 2. Зависимость величины эффекта снижения гидродинамического сопротивления трения $\Delta\lambda/\lambda$, % от концентрации C , моль/л КJ, КОН, K_2SO_4 и K_2CO_3 (кривые 1, 2, 3 и 4 соответственно) в водном 0,0002%-ом растворе ПЭО с молекулярной массой 10^6 [14]

При решении вопроса практического применения снижающих гидродинамическое сопротивление добавок в обязательном порядке необходимо учитывать, какие электролиты, и в каком количестве они находятся в стоках, подлежащих аварийному отведению воды. Из данных работы [14] следует, что чем сильнее электролит разрушает структуру воды, тем сильнее уменьшается характеристическая вязкость растворов ПЭО, а, следовательно, следует ожидать, что в них будет пропорционально уменьшаться и величина эффекта снижения гидродинамического сопротивления.

Влияние соли возрастает с увеличением молекулярной массы ПЭО, т.е. высокомолекулярные полимеры оказываются более чувствительными к действию солей. Следует отметить, что аналогичный вывод следует и из сравнения температурных зависимостей характеристической вязкости водных растворов ПЭО различных молекулярных масс. Это является вполне естественным, т.к. одинаковое изменение конформационного состояния цепи будет приводить к большим абсолютным изменениям размеров макромолекулярных клубков ПЭО при увеличении длины цепи, т.е. молекулярной массы.

Полученные результаты указывают на необходимость учитывать для каждого конкретного случая влияния солей на характеристическую вязкость растворов ПЭО, а, следовательно, и на их гидродинамическое сопротивление.

Особый интерес представляют результаты исследований по влиянию на гидродинамическую эффективность *неэлектролитов*, т.к. в зависимости от своей

природы они могут оказывать как структурирующее, так и деструктурирующее действие на воду.

На рис. 3 приведена зависимость величины эффекта снижения гидродинамического сопротивления от концентрации неэлектролитов в водных растворах ПЭО с молекулярной массой $M = 3 \cdot 10^6$ при температуре 20°C . В качестве добавок неэлектролитов были выбраны два химических соединения – мочевина и ацетон, которые по разному воздействуют на структуру воды. При этом мочевина оказывает деструктурирующее воздействие на воду, а ацетон, наоборот, ее структурирует. Из приведенных на рис. 3 данных видно, что с ростом концентрации мочевины в растворе величина эффекта снижения гидродинамического сопротивления постоянно падает, а при добавлении к раствору ПЭО ацетона – растет.

На основании проведенного анализа по влиянию температуры, добавок солей и неэлектролитов можно сделать вывод, что молекулярные аспекты снижения гидродинамического сопротивления заключаются в том, что величина достигаемого гидродинамического эффекта определяется не только молекулярной массой полимера, но и состоянием макромолекулярного клубка, его размерами, которые являются следствием конформации макромолекулярной цепи, зависящей от внешних условий и состава растворителя.

При аварийном отведении сточных вод (особенно химических предприятий) важно знать, какое влияние на величину эффекта снижения гидродинамического сопротивления $\Delta\lambda/\lambda$, % оказывает их водородный показатель (pH).

В качестве примера на рис. 4 приведены результаты экспериментальных исследований по влиянию pH на величину $\Delta\lambda/\lambda$, % для пяти концентраций водных растворов ПАА. Изменение pH в растворах производили путем введения небольших количеств соляной кислоты и едкого натрия.

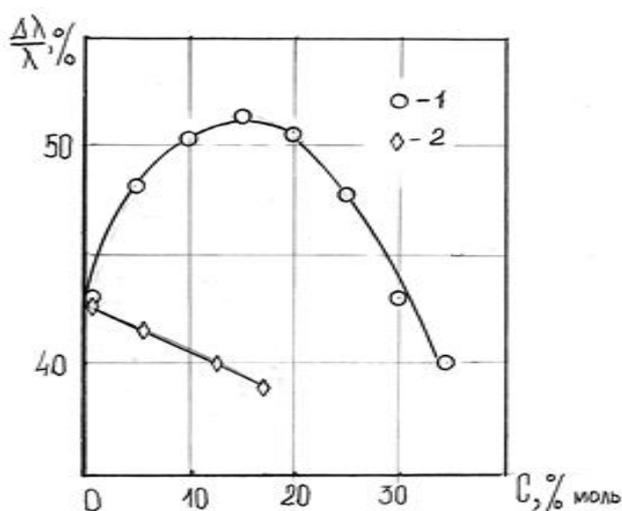


Рис. 3. Зависимость величины эффекта снижения гидродинамического сопротивления $\Delta\lambda/\lambda$, % от концентрации ацетона и мочевины (кривые 1 и 2 соответственно) в водных 0,001%-х растворах ПЭО с молекулярной массой $2,9 \cdot 10^6$. Данные работы [14]

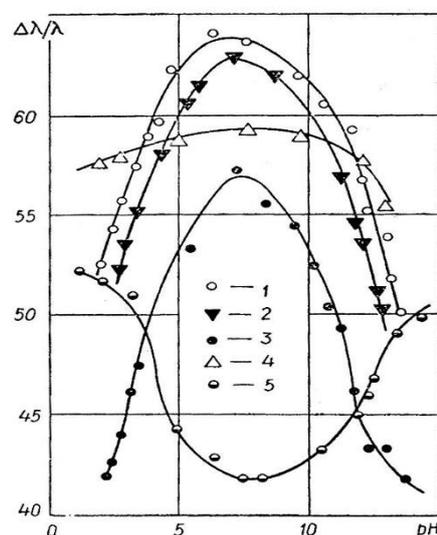


Рис. 4. Зависимость величины эффекта СГСТ $\Delta\lambda/\lambda$, % от водородного показателя среды pH в водных растворах ПАА.

Концентрация ПАА в растворах равна: 10^{-4} ; $2 \cdot 10^{-4}$; $2,5 \cdot 10^{-4}$; $5 \cdot 10^{-4}$ и 10^{-3} г/см³ (кривые 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно).
Данные работы [15]

Из приведенных на рис. 4 данных видно, что наибольший гидродинамический эффект проявляется в области значений $pH = (5-10)$. При этом величина $\Delta\lambda/\lambda$, % для растворов, содержащих 10^{-4} ; $2 \cdot 10^{-4}$; $2,5 \cdot 10^{-4}$ и $5 \cdot 10^{-4}$ ПАА лежит в диапазоне (52,5-63,0)%. Уменьшение величины pH ниже 5 и увеличение больше 10 приводит к резкой потере растворами гидродинамической эффективности [15].

В связи с вышеизложенным при практическом использовании явления снижения гидродинамического сопротивления добавками необходимо учитывать, каким значением водородного показателя характеризуется жидкая среда, в которой будет растворяться гидродинамически-активный полимер.

Достичь наиболее высокой гидродинамической эффективности полимера можно выбором оптимальных условий, способствующих наибольшему разворачиванию полимерного клубка. При отсутствии возможности реализовать этот путь следует заняться поиском другого полимера, для которого данные условия будут наиболее благоприятными. Так, например, при высоких температурах гидродинамическая эффективность ПЭО падает. В то же время для полиакриламида она сохраняется на достаточно высоком уровне, благодаря другому типу гидратации мономерных звеньев. Следовательно, можно сделать вывод, что при выборе полимера для снижения гидродинамического сопротивления необходимо учитывать особенности конформации и сольватации макромолекул в данной среде и в данных условиях [14,15].

Систематизация ранее опубликованных работ по проблеме.

Снижение ГСТТ сточных вод без механических примесей. В Донецком национальном университете в период с 1975 года по настоящее время ведутся систематические исследования по изучению водорастворимых полимерных композиций, применение которых значительно упрощает реализацию преимуществ эффекта Томса в промышленных масштабах.

В качестве примеров рассмотрим варианты применения высокомолекулярных полимерных композиций (ВПК) в канализационной системе и в установках шахтного водоотлива. Первоначально, в лабораторных условиях на капиллярном вискозиметре были проведены исследования по оценке гидродинамической эффективности полиэтиленоксида (ПЭО) в шахтной и канализационной водах. Пробы были отобраны из системы водоотлива шахты им. М.И.Калинина ГП «Донецкуголь» и канализационного коллектора г. Донецка. Результаты экспериментов показали (табл. 1), что максимальная величина эффекта снижения ГСТТ (равная 75 %), достигается в шахтной и сточной водах при содержании ПЭО с молекулярной массой $M = 4,8 \cdot 10^6$ (производства НИИ химической технологии, г. Новосибирск, Россия) равной 0,001–0,007 вес %. Такая же величина эффекта получена при использовании в качестве снижающей турбулентное трение добавки ПАА с $M = 4,2 \cdot 10^6$, синтезированного в опытном производстве НИФХИ им. Л. Я. Карпова (г. Москва).

Таблица 1. Зависимость величины эффекта СГСТ (Э, %) от содержания ПЭО ($C_{ПЭО}$, %, вес.) в шахтной воде (1) и в воде канализационного коллектора (2).

Данные получены на капиллярном вискозиметре с диаметром капилляра $d = 1,2$ мм и длиной 0,5 м. Температура исследуемых растворов $t, ^\circ C = 22$ [16].

№ п/п		Спэо, % вес.	$5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$5 \cdot 10^{-3}$	$7 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}
1.	Шахтная вода	Э, %	40	47	52	66	71	75	76	75	69
2.	Вода из канализационного коллектора	Э%	38	44	47	62	70	74	75	75	70

Промышленные испытания гидродинамической эффективности полимерных добавок проводились с использованием ВПК, содержащей 5 вес.% ПЭО и 95 вес.% смеси глицерина с водой, имеющей плотность, равную $1,23 \text{ г/см}^3$. Испытания проводились на участке трубопровода системы водоотлива шахты им. М.И. Калинина общей длиной 710 м. Выбранный участок состоял из труб диаметром 150 и 100 мм, протяжённость которых была равна 230 и 480 метров, соответственно. Перед испытанием, для увеличения скорости растворения, суспензия подвергалась термической обработке при температуре $t, ^\circ\text{C}=50$ в течение одного часа.

Результаты испытаний показали (табл. 2), что через 5 минут, с момента начала подачи полимерной композиции в трубопровод, гидравлические потери на всем испытываемом участке уменьшились на 12 %, а через 15 минут – на 55 % (при равных расходах воды и испытываемого раствора полимерной композиции). Очевидно, что для получения максимального гидродинамического эффекта на трубопроводах большой длины за малые промежутки времени, ВПК необходимо вводить одновременно в нескольких местах по длине трубопровода.

Таблица 2. Зависимость величины эффекта СГСТ (Ξ ,%) от времени ввода добавок (τ , мин) в трубопровод. Данные получены на участке трубы с диаметром 100 мм и длиной 200 м. Температура испытываемых жидкостей $t, ^\circ\text{C} = 28,5$ [16].

τ , мин	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Ξ ,%	12	37	55	57	60	59	58	60	59	60	60	60	60	60	59	60

Очевидно, что аналогичные результаты можно получить и при использовании гидродинамически-активных полимерных композиций в напорных канализационных системах, которые (по сравнению с системами водоотлива шахт) отличаются значительно большей длиной прямолинейных участков трубопроводов и меньшей минерализацией сточных вод. Поэтому следует ожидать, что эффективность применения добавок в этих системах будет выше.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что применение гидродинамически-активных ВПК на основе ПЭО и ПАА открывает широкие перспективы повышения эффективности работы централизованных канализационных систем, систем водоотведения и водоотлива без привлечения дополнительных мощностей и изменения их конструкции. При этом для каждого конкретного случая необходимо подобрать наиболее эффективную гидродинамически-активную полимерную композицию, которая обеспечит максимальное снижение гидравлических потерь в трубопроводах [1,16].

Снижение ГСТТ при гидротранспорте сыпучих материалов. Значительное снижение турбулентного трения, получаемого при введении в поток жидкости добавок полимеров, стимулировало работы по изучению возможности использования этого явления в канализационных системах и системах водоотведения, а также при гидротранспорте сыпучих материалов. Из известных публикаций первой в этом направлении является работа [17], в которой сообщается о 30%-ном уменьшении с помощью полимерных добавок потерь напора при транспортировке суспензии частиц шлама с объемным содержанием 7 % вес. по магистрали диаметром 15,2 см и длиной 805 м. Вид полимера, концентрация которого в эксперименте составила $C=3,6 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$, авторами работы не приводится. В работе [18] показана возможность

использования ПАА для снижения гидравлических потерь при движении водной суспензии кварцевого песка, объемная концентрация которого составляла 12 % вес.

В дальнейшем поставленные вопросы получили свое развитие в работах [19,20] по влиянию добавок ПАА на гидродинамическое сопротивление взвесенесущих потоков. В опытах в качестве твердой фазы использовали кварцевый песок, золу, глину, бурый и каменный угли. Эксперимент проводился на трубке диаметром 0,7 см при числе Рейнольдса для воды $Re=1,23 \cdot 10^4$. Концентрация ПАА менялась в пределах $C_{II}=0-10^{-3}$ г/см³, весовая концентрация песка варьировалась в интервале $C_T=0-37,5\%$.

Получено, что при течении раствора ПАА без твердой компоненты ($C_T=0$) в области малых концентраций полимера имеет место увеличение эффекта, который достигает максимального значения $\Delta\lambda/\lambda=58\%$ при некоторой оптимальной концентрации ПАА ($C_{II}=2,4 \cdot 10^{-4}$ г/см³). При дальнейшем увеличении концентрации полимера величина эффекта уменьшается. Добавление твердой компоненты (песка) в раствор ПАА приводит к уменьшению величины эффекта во всей области изменения концентраций полимера. При этом максимальное снижение сопротивления (для всех исследуемых концентраций твердой фазы) достигается при одной и той же концентрации полиакриламида ($C_{II}=2,4 \cdot 10^{-4}$ г/см³). С увеличением концентрации песка величина эффекта уменьшается.

На рис. 5 приведены данные опытов, где в качестве твердой компоненты использовались золы, отработанные на ГРЭС. Крупность частиц золы 0-2,5 мм, удельный вес 1,3 г/см³. Из рис.5 видно, что с увеличением концентрации ПАА величина снижения сопротивления возрастает и достигает максимального значения при $C_{II}=5 \cdot 10^{-4}$ г/см³ (для всех концентраций твердой фазы). При этом максимальная величина эффекта больше, чем для соответствующих концентраций песка. Это связано с различием удельных весов золы и песка, вследствие чего на работу взвешивания частиц золы в турбулентном потоке затрачивается меньшая энергия.

На рис. 6 приведены опытные данные для водного взвесенесущего потока, содержащего кварцевый песок весовой концентрации $C_T=10\%$ (крупность 0,1-0,3 мм) и полиакриламид концентрации $C_n=2,2 \cdot 10^{-4}$ г/см³. По оси абсцисс отложено число Рейнольдса Re , а по оси ординат - коэффициент гидродинамического сопротивления λ . Вязкость водопесчаной смеси, по которой определялось число Re , рассчитывалась по формуле 4.

$$\mu_c = \mu_0 \left[1 + \frac{2C_v}{(1 - 1,2C_v^{2/3})^2} \right], \quad (4)$$

где μ_0 – вязкость воды; C_v – объемная концентрация твердой фазы [21].

Из рис. 6 видно, что снижение сопротивления водопесчаной смеси начинается при пороговом числе Рейнольдса Re_{np} , которое с увеличением температуры смещается в сторону больших значений. Полученный результат коррелирует с опытными данными для однородных полимерных растворов. При $Re > Re_{np}$ коэффициент сопротивления λ водопесчаной суспензии меньше, чем у дисперсионной среды (воды).

В опытах, где в качестве твердой компоненты использовались мелкие частицы бурого и каменного углей, снижения сопротивления не наблюдалось. Это, очевидно, связано с тем, что молекулы ПАА адсорбируются на частицах угля и вследствие этого теряют способность воздействовать на турбулентность. Отрицательные результаты получены и в опытах с растворами буровой глины. При введении добавок ПАА в раствор глины образуются хлопья, которые выпадают в осадок [20].

Исследованию влияния полимерных добавок на сопротивление трения многофазных сред посвящен ряд работ более позднего периода. Так, в работах [22,23] приведены результаты экспериментов по гидротранспорту шламов с добавками ПАА и поликристаллата. Достигнутое в опытах снижение сопротивления составляло около 60%. Авторы работы [23] изучили влияние добавок полимеров на гидротранспорт капсулированных продуктов, в качестве которых использовались сплошные алюминиевые и стальные цилиндры различной длины. При оптимальной концентрации добавок величина эффекта достигала 35%.

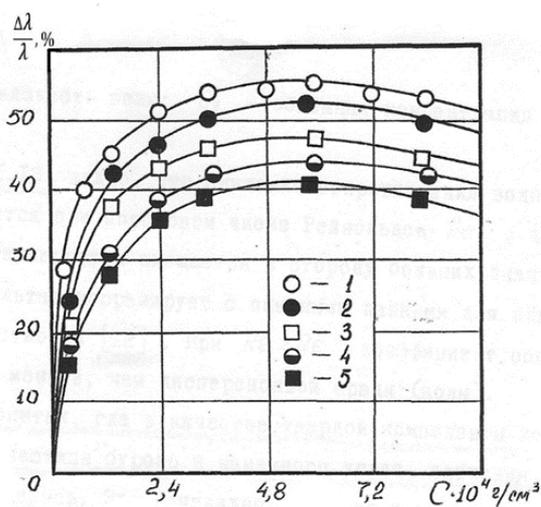


Рис. 5. Зависимость величины $\Delta\lambda/\lambda, \%$ от концентрации ПАА для взвесенесущего потока с концентрацией золы: 1 - $C_T=0\%$ вес.; 2 - $C_T=7,5\%$ вес.; 3 - $C_T=15\%$ вес.; 4 - $C_T=22,5\%$ вес.; 5 - $C_T=30\%$ вес [19].

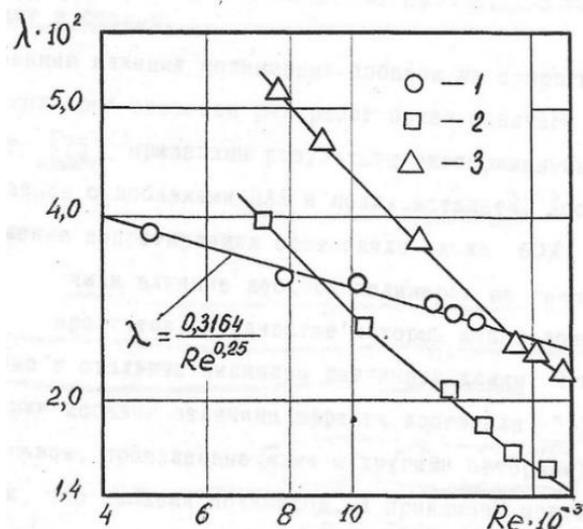


Рис. 6. Зависимость величины λ от Re при течении чистой воды (1) и раствора ПАА ($C_{II}=2,2 \cdot 10^{-4}$ г/см³) с песком ($C_T=10\%$ вес.) при температурах $T=20^\circ\text{C}$ (2) и $T=31^\circ\text{C}$ (3). Данные работы [19].

Таким образом, проведенные исследования показали, что добавки полимеров могут быть использованы для повышения эффективности работы гидротранспорта взвесенесущих сред, а также для снижения гидравлических потерь в трубопроводах канализационных систем и систем водоотведения сточных вод, которые загрязнены механическими примесями. Однако при практической реализации этого метода снижения турбулентного трения необходимо свести к минимуму или вообще исключить воздействия насосов на полимерные молекулы, а главное – флокулирующее воздействие полимеров на тонкодисперсную часть транспортируемых веществ. Частично эти проблемы были решены авторами работ, которые применяли для снижения ГСТТ мицеллообразующие поверхностно-активные вещества и различные полимерные композиции [1,20].

На рис. 7 представлены результаты опытов с однородными и взвесенесущими потоками, в которых использовалась смесь двух ПАВ - пальмитата натрия и стеарата калия, взятых в количественном соотношении 9:1. Предварительно выполненные эксперименты показали, что в водном растворе такой смеси наблюдается значительное снижение гидродинамического сопротивления - до 72% при концентрации добавки $C=0,11\%$. Для улучшения растворимости указанных ПАВ раствор подогревался до 31°C . В опытах использовался кварцевый песок крупностью 0,1-0,3 мм. Вязкость суспензии, по которой определялось число Рейнольдса, рассчитывалась по формуле (4).

Из рис. 7 видно, что добавки ПАВ приводят к существенному снижению сопротивления воды и суспензии. С увеличением концентрации твердой фазы величина эффекта несколько уменьшается, но остается довольно значительной. При $Re = 2 \cdot 10^4$ и концентрации твердой фазы (кварцевого песка) $C_m = 10$ и 20% величина эффекта составляет 60 и 50% соответственно.

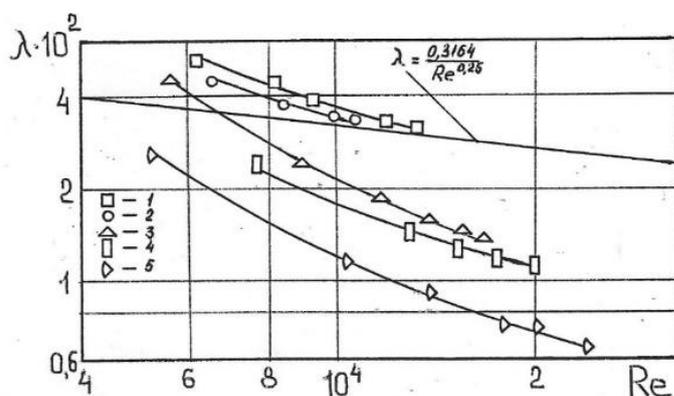


Рис. 7. Зависимость величины λ от Re для взвесенесущего потока:
 1 - $C_T = 20$ % вес.; 2 - $C_T = 10$ % вес.; 3 - $C_T = 20$ % вес., $C_P = 0,12$ % вес.;
 4 - $C_T = 10$ % вес., $C_P = 0,12$ % вес.; 5 - $C_T = 0$ % вес., $C_P = 0,12$ % вес. [19]

Сопоставление полученных результатов с опытными данными для взвесенесущих, потоков с добавками полимера показывает, что для получения одинаковых по величине эффектов снижения сопротивления необходима большая концентрация ПАВ. Однако в отличие от полимеров добавки ПАВ после прохождения через насосы способны восстанавливать свою гидродинамическую эффективность. Следовательно, ПАВ могут быть успешно использованы для повышения эффективности гидротранспорта взвесенесущих сред.

Снижение гидравлических потерь в глинистых и гипсовых растворах. В процессе проведения строительных работ (при бурении скважин) возникает необходимость повышать скорость течения подаваемых в скважину (забой) промывочных жидкостей. При этом в результате роста гидравлических потерь в напорных трубопроводах, существенно увеличиваются затраты электроэнергии, а также резко возрастает давление в забое, что затрудняет работу бурового инструмента.

Многочисленные попытки снизить гидродинамическое сопротивление трения путем введения в глинистый раствор добавок высокомолекулярных полимеров (полиэтиленоксида – ПЭО, полиакриламида – ПАА) желаемого результата не дали. Это связано с интенсивной механической деструкцией этих добавок и нежелательными физико-химическими явлениями, такими как коагуляция и флокуляция дисперсной фазы. Так, например, в процессе проведенных исследований было установлено, что ПАА вызывает интенсивную флокуляцию твердой фазы в глинистом растворе, которая препятствует проявлению эффекта снижения гидродинамического сопротивления.

В ходе ликвидации подземных пожаров в угольных шахтах, широкое применение получили комплексы оборудования СНУ Темп-200, Темп-500, которые предназначены для дистанционного возведения безврубовых, взрывоустойчивых и изолирующих перемычек из гипсовых вяжущих, которые применяются для изоляции пожаров в шахтах[1].

При эксплуатации комплексов типа «Темп» очень часто возникают технические трудности, которые, в первую очередь, связаны с транспортировкой гипсовых растворов по трубопроводам. Установлено, что за счет быстрого схватывания водногипсовой смеси её укладка в опалубку идет с низкой скоростью, оборудование работает со значительными перегрузками, а в ряде случаев схватывание гипсового теста происходит непосредственно в подающем водно-гипсовую смесь трубопроводе или в рукавной линии. Кроме этого, возводимые перегородки обладают низкой водостойкостью, высокой ползучестью под нагрузкой, хрупкостью при использовании в тонкостенных элементах, что значительно ухудшает их эксплуатационные качества.

Для замедления схватывания гипсовой смеси в нее рекомендуют добавлять животный клей или сульфатно-спиртовую барду (ССБ) в количестве $0,1 \div 3,0$ вес. % от массы гипса. Эти вещества, адсорбируясь на зернах полуводного гипса, уменьшают его растворимость и тем самым замедляют процесс схватывания гипсового теста. Однако широкого применения вышеуказанные добавки не получили, т.к. увеличение промежутка времени с момента затворения гипса до начала схватывания было незначительным. При этом происходит также ухудшение физико-механических и эксплуатационных свойств получаемого гипсового камня.

Существенно увеличить промежуток времени с момента затворения до начала схватывания водногипсовой смеси можно за счет ввода в затворяющую гипс воду микродобавок высокомолекулярных полимеров. При этом, за счет снижения добавками полимеров гидравлических потерь в подающих водно-гипсовую смесь трубопроводах, увеличивается ее расход, что может значительно сократить время, необходимое на возведение гипсовых перегородок.

Лабораторные исследования [1,16]. В качестве добавок к затворяющей гипс воде были выбраны: сульфатно-спиртовая барда (ССБ), как прототип, и водорастворимый высокомолекулярный полимер (ПЭО) с молекулярной массой $(2,5 \dots 4,2) \cdot 10^6$.

Как показали результаты исследований, использование ССБ увеличивает промежуток времени с момента затворения до начала затвердевания гипсового теста в $1,1 \dots 1,2$ раза. При этом промежуток времени, с момента затворения до окончания схватывания гипса, возрастает в $4 \dots 5$ раз, а прочностные характеристики гипсового камня ухудшаются.

С целью разработки практических рекомендаций были проведены исследования по влиянию добавок ПЭО и ПАА на следующие характеристики гипсовых растворов и образующегося из них гипсового камня: нормальную плотность, оптимальное соотношение гипс – затворяющая жидкость, которые определяют транспортировку смеси по трубопроводу и обеспечивают формирование гипсового камня требуемой прочности; промежутки времени с момента затворения гипса до времени начала и окончания схватывания гипсового теста; предел прочности при сжатии образовавшегося гипсового камня.

Проведенные на вискозиметре Сутгарда испытания для трех разновидностей гипса – фосфогипса, шлакогипса и гипса А – показали, что нормальная плотность теста достигается при соотношении гипс – вода равном 7:3.

Определение предела прочности образующегося гипсового камня проводили по следующей схеме. Первоначально из исследуемого гипса с различными затворяющими жидкостями, изготавливали по три образца в виде кубиков с размерами $7,07 \times 7,07 \times 7,07$ см. Для изготовления образцов брали навеску гипса, равную примерно 1,2 кг. Гипс в течение 30 сек засыпали в чашку с водой или полимерным раствором, взятыми в количестве, соответствующем нормальной плотности теста, и перемешивали в

течение 1 мин до получения однородной массы, которую затем заливали в металлические формы, слегка смазанные машинным маслом. Все формы заполняли одновременно. Образцы вынимают из форм через 1 час и испытывали через $1,5$ часа от начала затворения. Грани образца, прилегающие к плитам пресса, должны быть параллельны и не иметь отклонений от плоскости больше чем на $0,5$ мм. Образцы с дефектами не испытывали.

Нагрузка при испытании на прессе должна возрастать равномерно со скоростью $2-3$ кг/см² в секунду до разрушения образца. Предел прочности при сжатии отдельного образца вычисляли в кг/см², как частное от деления величины разрушающей нагрузки в кг на величину площади рабочей грани образца в см². Предел прочности гипса при сжатии вычисляли как среднее арифметическое значение результатов испытаний трех образцов.

Результаты эксперимента для всех трех исследованных разновидностей гипса показали, что введение в затворяющую жидкость ($0,00075 \div 0,01$) вес. % высокомолекулярного ПЭО позволяет на ($10-25$) % увеличить прочность гипсового камня при сжатии.

Гидравлические потери при подаче водно-гипсовой смеси и этой же смеси с добавками определяли на гидродинамической установке с постоянным перепадом давления. (длина трубы – 3 м, диаметр – 20 мм). Такая установка позволяет определить время истечения определенного объема гипсового раствора от его выдержки во времени. При этом с достаточной точностью определяются времена истечения гипсовых растворов самых различных концентраций, несмотря на то что в них происходит достаточно быстрое изменение физико-химических свойств.

Экспериментальные исследования проводили с использованием образцов фосфогипса и гипса А. Анализ полученных результатов показал, что при концентрациях ПЭО в затворяющей гипс жидкости, меньших $0,0005$ вес. % наряду с уменьшением скорости схватывания гипса происходит уменьшение гидравлических потерь. Так, при концентрации фосфогипса равной 55 вес. % в затворяющей жидкости, которая, в свою очередь, содержит $0,0005$ вес. % ПЭО, величина промежутка времени с момента затворения до начала схватывания увеличивается в среднем на 20 %, а время истечения уменьшается на 3 -ей и 5 -ой минутах, с момента начала приготовления смеси, в $1,7$ и $2,1$ раза соответственно.

Полигонные испытания [1,16]. Полигонные испытания по определению влияния полимерных добавок на транспортировку гипсовых растворов по трубопроводам были проведены на полигоне 3-го взвода ГВГСС Минуглепрома Украины (г. Макеевка, Донецкая обл.) с использованием комплекса СНУ Темп-500 и вспомогательного оборудования для растворения и дозированного ввода микродобавок полимерных композиций в рукавную линию.

В ходе полигонных испытаний, которые проводились в два этапа, контролировались следующие параметры: время выхода установки на оптимальный режим, сек; давление гипсовой смеси на выходе из СНУ, кг/см²; расход воды через гипсосмеситель, л/с; ток, потребляемый электродвигателем гипсосмесителя, А; давление воды, создаваемое подпиточным насосом на входе в СНУ, кг/см²; концентрация полимера в затворяющей гипс жидкости, вес. %; время схватывания отлитого гипсового блока, сек.

Для подачи гипсового раствора использовали пожарные рукава с внутренним диаметром 51 мм и длиной 140 метров. На конце рукавной линии устанавливали ручной пожарный ствол с внутренним диаметром насадка 18 мм.

На первом этапе испытаний использовались в качестве затворяющей гипс жидкости использовали растворы ЖВПК, ввод и дозирование которых в рукавную линию осуществляли с помощью модифицированного пеносмесителя ПС-1, на всасывающем патрубке которого были установлены калиброванные шайбы диаметром 1,8; 2,04 и 2,2 мм. Концентрированные растворы полимеров приготавливали непосредственно перед испытаниями.

Контроль расхода концентрированного раствора ЖВПК производился с помощью мерной емкости и секундомера. Например, при использовании шайбы диаметром живого сечения равном 1,8 мм, расход концентрированного раствора, содержащего 0,05 вес. % ПЭО, при расходе воды по рукавной линии равном 1,45 л/с, составил 2,8 мл/с.

На втором этапе затворяющую гипс жидкость с полимерными добавками приготавливали путем размыва твердых водорастворимых полимерных композиций (ТВПК) в проточной кассете, установленной в рукавную линию. Результаты испытаний приведены в табл. 3. Из приведенных данных видно, что приготовление раствора полимерной композиции на основе ПЭО (эксперимент № 2) приводит к снижению гидравлических потерь в рукавной линии, при подаче гипсового раствора, с 0,5 кг/см² до 0,25 кг/см², и уменьшению потребляемого СЧУ тока с 17 А до 14 А.

Следует ожидать, что увеличение длины рукавной линии, по которой подается водно-гипсовая смесь, приведет к еще большему снижению гидравлических потерь и уменьшению потребляемого СЧУ тока за счет увеличения вклада потерь на трение (по сравнению с потерями на местных сопротивлениях).

Результаты опытов № 3 и № 4 показывают, что использование в качестве затворяющей гипс А жидкости водного раствора полимерной композиции с содержанием ПЭО $2,3 \cdot 10^{-4}$ вес. % уменьшает давление в рукавной линии с 2,5 до 1,2 кг/см², а потребляемый СЧУ ток с 19,5 А до 16,5 А.

Аналогичные данные получены для фосфогипса (данные опытов № 5 и № 6).

Таблица 3. Результаты полигонных испытаний [1]

№п/п	Испытываемая жидкость	Давление в рукавной линии, кг/см ²	Расход воды, л/с	Давление воды создаваемое подпиточным насосом, кг/см ²	Потребляемый ток, А	Содержание ПЭО в затворяющей жидкости, вес. % *10 ⁻⁴	Примечание
I-й Этап							
1.	Вода	0,5	1,48	3,0	17	0	Затворяющую гипс жидкость приготавливали путем предварительного растворения полимерной композиции и подачей полученного раствора в рукавную линию ПС-1
2.	Раствор полимерной композиции	0,25	1,45	3,0	14	3,5	
3.	Гипс А + вода	2,5	1,45	3,0	19,5	0	
4.	Гипс А + водный раствор полимерной композиции	1,2	1,45	3,0	16,5	2,3	

II-й Этап							
5.	Фосфогипс + вода	2,6	1,45	3,0	20	0	Затворяющую гипс жидкость приготавливали размывом ТВПК в кассете
6.	Фосфогипс + водный раствор ТВПК	1,0	1,45	3,0	17	2,0	

Для приготовления модифицированной микродобавками полимеров затворяющей гипс жидкости использовали проточную кассету с брикетом из ТВПК. Видно, что введение в затворяющую фосфогипс воду $2,0 \cdot 10^{-4}$ вес. % высокомолекулярного ПЭО уменьшает давление в рукавной линии с 2,6 до 1,0 кг/см², а потребляемый СЧУ ток с 20 А до 17 А.

Таким образом, если в качестве затворяющих гипс жидкостей использовать слабоконцентрированные ($0,0002 \div 0,00075$ вес. %) растворы высокомолекулярного ПЭО, то можно в 1,2÷1,5 раза увеличить величину промежутка времени с момента затворения до начала схватывания гипса. Кроме этого, в процессе транспортировки гипсового раствора по рукавной линии гидравлические потери уменьшаются на 45-60 %. Введение микродобавок приводит также к повышению на (10-25) % прочность на сжатие образующегося гипсового камня. При этом время с момента затворения до окончания схватывания гипса практически не изменяется.

Перспективы развития работ по проблеме. Синтетические и природные полимеры, а также различные композиции на их основе занимают важное место при решении проблем энергосбережения и экологии. В первую очередь это относится к уменьшению выбросов вредных веществ в окружающую среду, ликвидации последствий техногенных аварий и природных бедствий, улучшению технических характеристик различных гидравлических систем и устройств [1].

В работах [24-34] приведены результаты лабораторных исследований и промышленных испытаний по применению различных водорастворимых полимерных композиций (ВПК) и генераторов приготовления из них растворов для применения в пожаротушении, при аварийном водоотведении централизованными и мобильными установками, в технологических процессах гидроструйной обработки твердых материалов.

Применение таких ВПК, с учетом основных закономерностей эффекта Томса и влияния различных факторов на его величину, имеет большие перспективы практического использования для повышения эффективности работы гидравлических систем гидротранспорта сыпучих материалов, канализации и отведения сточных вод с различным содержанием механических примесей

Выводы. 1. Дополнены и систематизированы результаты экспериментальных исследований по основным закономерностям эффекта Томса в однородных растворах ВП и влиянию различных факторов на его величину, которые позволяют усовершенствовать процесс гидродинамического проектирования гидравлических систем с потенциальным применением явления снижения ГСТТ.

2. Показаны перспективы практического использования результатов работ по уточнению известных, разработке новых гидродинамически-активных полимерных композиций и генераторов приготовления из них растворов для снижения гидравлических потерь потоков жидкостей в напорных трубопроводах.

3. Систематизированы экспериментальные данные по снижению ГСТТ добавками гидродинамически-активных ВП в турбулентных потоках грубодисперсных суспензий кварцевого песка, шламов, капсулированных тонкодисперсных продуктов и др., которые подтверждают целесообразность применения эффекта Томса при гидротранспорте сыпучих материалов.

4. Установлено, что введение добавок высокомолекулярных полимеров (ПЭО и ПАА) в глинистые растворы и в тонкодисперсные суспензии бурого и каменного углей не приводит к снижению ГСТТ при их подаче по напорным трубопроводам. Отрицательные результаты можно объяснить проявлением флокулирующей активности этих полимеров по отношению к механическим примесям. В тоже время введение в глинистые растворы гидродинамически-активных МПАВ снижает гидравлические потери в трубах на 60...70 %.

5. Определено влияние микродобавок высокомолекулярного ПЭО на транспортировку гипсовых растворов в трубах. Показано, что использование вместо воды в качестве затворяющих гипс слабо концентрированных растворов ПЭО (0,0002...0,0007 вес. %) в 1,2...1,5 раза увеличивает промежуток времени с момента затворения до начала схватывания гипса. Это позволяет снизить гидравлические потери при подаче гипсовых растворов в трубах на 45...60 %.

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 / Симоненко Александр Петрович. – Донецк, 2013. – 397 с.
2. Основные закономерности эффекта Томса и влияние различных факторов на его величину / А. П. Симоненко [и др.] // Вестник Автомобильно-дорожного института ДонНТУ. – 2016. – № 2 (19). – С. 66-73
3. Пилипенко В. Н. Трение и теплообмен при турбулентном течении слабых растворов в гладких трубах / В. Н. Пилипенко // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1975. – № 5. – С. 225-230.
4. О снижении гидродинамического сопротивления добавками полимеров / Л. И. Седов [и др.] // Механика турбулентных потоков : сборник. – Москва, 1980. С. 7-28.
5. Повх И. Л. Снижение гидродинамического сопротивления добавками / И. Л. Повх, А. Б. Ступин // Физическая гидродинамика : [сб. ст.]. – Киев ; Донецк, 1977. – С. 7-19.
6. Хойт Д. У. Влияние добавок на сопротивление трения в жидкости / Д. У. Хойт // Труды американского общества инженеров-механиков. Серия D : Теоретические основы инженерных расчётов. – 1971. – № 2. – С. 1-31.
7. Иванюта Ю. Ф. Турбулентные трения растворов полиокса в трубе с большой шероховатостью / Ю. Ф. Иванюта, Л. А. Чекалова // Инженерно-физический журнал. – 1976. – Т. 31, № 2. – С. 225-230.
8. Неронова И. А. Деструкция полиэксэтилена и её связь со снижением сопротивления трения в турбулентном потоке / И. А. Неронова // Механика турбулентных потоков : сборник. – Москва, 1980. – С. 364-368.
9. Анисимов И. А. Зависимость деструкции водного раствора полиэтиленоксида от работы сил трения / И. А. Анисимов, Б. П. Миронов // Турбулентные сдвиговые течения неньютоновских жидкостей : сборник. – Новосибирск, 1981. – С. 14-38.
10. Повх И. Л. Связь между молекулярным строением полиэтиленоксида и эффектом снижения гидродинамического сопротивления / И. Л. Повх, В. Г. Погребняк, А. И. Торяник // Инженерно-физический журнал. – 1979. – Т. 37, № 4. – С. 581-588.
11. Иванюта Ю. Ф. Экспериментальное исследование турбулентного течения слабых растворов полимеров в трубах различного диаметра / Ю. Ф. Иванюта, Л. А. Чекалова // Инженерно-физический журнал. – 1971. – Т. 21, № 1. – С. 5-12.
12. Химический энциклопедический словарь / гл. ред. И. Л. Кнунянц. – Москва : Сов. энцикл., 1983. – 792 с.
13. Николаев А. Ф. Водорастворимые полимеры / А. Ф. Николаев, Г. И. Охрименко. – Ленинград : Химия, 1979. – 145 с.

14. Торяник А. И. Молекулярные аспекты снижения гидродинамического сопротивления добавками полимеров / А. И. Торяник // Физическая гидродинамика : сб. науч. тр. – Донецк, 1990. – С. 26-32.
15. Влияние водородного показателя среды pH на снижение сопротивления слабых растворов полимеров / И. Л. Повх [и др.] // Бионика : респ. сб. – Киев, 1975. – № 9. – С. 74-78.
16. Проблемы экологии и техногенно-экологической безопасности : монография / [А. Б. Ступин и др. ; под общ. ред. А. Б. Ступина] ; Донецкий нац. ун-т. – Донецк : ДонНУ, 2010. – 503 с. : ил.
17. Drag reduction in hydraulic transport of solids / M. Poreh [et al.] // J. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng. – 1970. – No. 4. – P. 903-909
18. Шабрин А. Н. Исследование гидравлических потерь в водных потоках с полимерными добавками / А. Н. Шабрин // Гидромеханика : респ. межвед. сб. – 1970. – Вып. 16. – С. 40-43.
19. Повх И. Л. Влияние добавок полиакриламида на снижение гидравлических потерь в водных потоках с твердыми частицами / И. Л. Повх, А. Б. Ступин // Инженерно-физический журнал. – 1972. – № 5. – С. 919-921
20. Снижение гидродинамического сопротивления взвесенесущих потоков добавками полимеров и поверхностно-активных веществ / И. Л. Повх [и др.] // Известия высших учебных заведений. Энергетика. – 1975. – № 4. – С. 101-103
21. Кургаев Е. Ф. О вязкости суспензий / Е. Ф. Кургаев // Доклады АН СССР. – 1960. – Т. 132, № 2. – С. 392-394.
22. Polert J. Aplikace Tomsova jevu v suspenzi aktivovancho ka-lu / J. Polert // Vodohosp.cas. – 1974. – № 5. – P. 515-527.
23. Latto B. The drag and pressure drops for hydrodynamically suspended cylinders in a vertical tube with and without additives / B. Latto, S. W. Lee // Can. d. Chem. Eng. – 1978. – № 3. – P. 304-309
24. Симоненко А. П. Водорастворимые брикеты на основе высокомолекулярного полиэтиленоксида и перспективы их практического применения в энергосбережении и экологии / А. П. Симоненко // Збірник наукових праць СНУАЕтаП. Екологічна безпека. – Севастополь, 2012. – Вип. 3 (43). – С. 100-108.
25. Симоненко О. П. Перспективи застосування флокового покриття з водорозчинними полімерними наповнювачами в енергозбереженні й екології / О. П. Симоненко // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2012. – № 726 : Хімія, технологія речовин та їх застосування. – С. 252-257.
26. Ступин А. Б. Гидродинамически-активные композиции в энергосбережении и экологии / А. Б. Ступин, А. П. Симоненко, П. В. Асланов. – Донецк : ДонГУ, 1999. – 228 с.
27. Ступін О. Б. Гідродинамічно-активні водорозчинні полімерні композиції і перспективи їх застосування в енергозбереженні й екології / О. Б. Ступін, О. П. Симоненко, П. В. Асланов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2013. – № 758 : Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. – С. 85-96.
28. Симоненко А. П. Применение флокового покрытия с водорастворимыми полимерными наполнителями в энергосбережении и экологии / А. П. Симоненко [и др.] // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Інженерні системи та техногенна безпека : зб. наук. пр. – Макіївка, 2012. – № 2012-2 (94). – С. 15-21.
29. Симоненко А. П. Перспективы практического применения эффекта Томса в гидравлических системах при чрезвычайных ситуациях / А. П. Симоненко // Збірник наукових праць СНУАЕтаП. Екологічна безпека. – Севастополь, 2012. – Вип. 4 (44). – С. 232-241.
30. Симоненко А. П. Повышение эффективности работы мобильных установок аварийной откачки воды добавками гидродинамически-активных полимерных композиций / А. П. Симоненко // Вісник НУВПП. Серія технічні науки. – Рівне, 2012. – Вип. 1 (57). – С. 41-47.
31. Быковская Н. В. Повышение эффективности работы систем аварийного водоотлива и канализации / Н. В. Быковская, А. Б. Ступин, А. П. Симоненко // Вісник Донецького університету. Серія А: Природничі науки. – 2004. – Вип. 1, ч. 1. – С. 475-480.
32. Ступин А. Б. Повышение эффективности работы систем пожаротушения, канализации и аварийной откачки сточных вод / А. Б. Ступин [и др.] // Проблемы экологии и техногенно-экологической безопасности. – Донецк, 2010. – Разд. 5. – С. 140-200.
33. Симоненко А. П. Перспективы практического применения гидродинамически-активных добавок в гидравлических системах при чрезвычайных ситуациях / А. П. Симоненко, П. В. Асланов, Н. А. Дмитренко // Экология и защита окружающей среды : сб. тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., 19-20 марта 2014 г. / под ред. Грицук А. Е. – Минск, 2014. – С. 309-313.

34. Симоненко А. П. Применение эффекта Томса для уменьшения гидравлических потерь в канализационных коллекторах и системах водоотведения при чрезвычайных ситуациях / А. П. Симоненко, П. В. Асланов, Н. А. Дмитренко // Экология и защита окружающей среды : сб. тез. докл. II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 25 марта 2015 г. / редкол. : С. Н. Петруша [и др.] ; под общ. ред. А. Е. Грицука. – Минск, 2015. – С. 137-140.

Поступила в редакцию 05.11.2018 г.

PROSPECTS OF THE APPLICATION OF THE TOMS EFFECT TO IMPROVE EFFECTIVENESS OF HYDRAULIC SYSTEMS OF HYDRO TRANSPORTATION OF BULK MATERIALS, SEWAGE AND DISPOSAL OF WASTEWATER

A.P. Simonenko, I.A. Artemova

In the present work, for the first time, the results of experimental studies on the application of the reduction of hydrodynamic resistance of turbulent friction (HRTF) with additives of soluble high-molecular polymers (Toms effect) in suspensions of solid particles, clay and gypsum solutions, in wastewater with varying degrees of contamination by mechanical impurities are systematized. The results obtained allow to determine the main requirements for the application of hydrodynamic active additives of high molecular weight polymers and compositions based on its in hydraulic systems for hydrotransport of bulk materials, to increase the throughput of pipelines of sewage systems and water disposal. Particular attention in the article is paid to reducing hydraulic losses when feeding clay and gypsum solutions in pressure pipelines.

Keywords: reduction of hydraulic losses, Toms effect, polyacrylamide, polyethylene oxide, surfactants, suspensions, suspended flows, clay and gypsum solutions, hydrotransport of bulk materials, sewerage and water disposal, recommendations for use.

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

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

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

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

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

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

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

3. Обязательные требования к оформлению статей:

- **Размер бумаги:** А4.
- **Ориентация:** книжная.
- **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
- **Положение верхнего и нижнего колонтитула относительно края:** 2 см.
- **Междустрочный интервал:** одинарный.
- **Абзацный отступ:** 1 см.
- **Основной текст статьи:** шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
- **Аннотация, таблицы, подрисуночные подписи, список литературы, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.

4. Текст статьи должен соответствовать следующей структурной схеме:

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

5. Образец оформления статьи:

УДК 537.86

ФУНКЦИИ СЛОЖНОСТИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ УЧАСТКОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ

© 2017 *И.А. Третьяков, В.В. Данилов*

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

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

Введение. При проведении исследований различных физических явлений...

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

Этап сегментации. Сегментация экспериментальных кривых или...

Выводы. В данной работе рассмотрена методика ...

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Поступила в редакцию xx.xx.20xx г.

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

Tretiakov I., Danilov V.

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

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

Третьяков Игорь Александрович

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

Tretiakov Igor

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

Данилов Владимир Васильевич

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

Danilov Vladimir

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

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

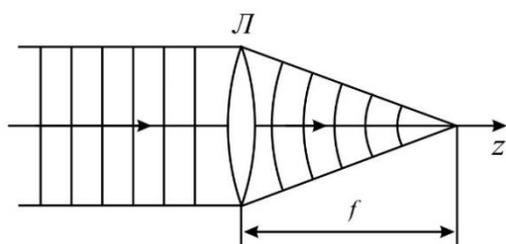


Рис. 4. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F₃

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

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

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

Образец оформления формулы:

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

8. Материалы предоставляются по адресу:

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

Главный редактор: Белоусов Вячеслав Владимирович, каб. 252.

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

Ответственный секретарь: Третьяков Игорь Александрович, каб 210.

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

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

Научное издание

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

2018. – № 4

Технический редактор: И.А. Третьяков

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

Подписано в печать 28.12.2018 г.
Формат 60×84/8. Бумага офсетная.
Печать – цифровая. Усл. печ. л. 13,41
Тираж 100 экз. Заказ. №

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