

ISSN 2663-4228

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ
*Основан
в 1997 году*

Серия Г
**Технические
науки**

1/2019

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

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

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

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

Члены редколлегии: д-р техн. наук, доц. **Н.И. Болонов**; д-р техн. наук, проф. **С.А. Горожанкин**; канд. техн. наук, доц. **В.Д. Корнев**; канд. техн. наук, ст. науч. сотр. **А.А. Курушин** (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Российская Федерация); канд. техн. наук, доц. **И.А. Молоковский**; канд. техн. наук, доц. **В.В. Паслён**; канд. физ.-мат. наук, доц. **В.И. Тимченко**; канд. техн. наук **Т.В. Ермоленко**; канд. техн. наук **Т.В. Шарий**; 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. Ermolenko**; Cand. of tech. **T.V. Sharii**; 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»,
ДНР 83001, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24

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

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

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

Журнал включен в **РИНЦ:** <https://elibrary.ru/titles.asp?sortorder=0&titlename=2663-4228>

*Печатается по решению Ученого совета
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»
Протокол №4 от 26.04.2019 г.*

Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Серия Г: Технические науки

№ 1

Донецк 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Пометун Е.Д., Белоусов В.В., Болонов Н.И., Лебедев В.Н. Исследование динамических характеристик термометра на основе NTC – термистора 3

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Бабичева М.В., Колтунов К.В., Яновский А.В. Особенности аппаратных атак в беспроводных сетях 9

Шелехова О.Г., Куценко В.В., Попадин В.И. Оценка влияния температуры окружающей среды на показатели надёжности детектора банкнот 17

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Третьяков И.А., Шалаев А.В., Данилов В.В. Методика исследования акустооптического элемента спектрального уплотнения–разуплотнения потоков данных автоматизированных систем 24

Бабичева М.В., Верескун И.С. Уязвимость криптографической хеш-функции MD5 к атаке поиска коллизии 31

Данилов В.В., Тимченко В.И., Третьяков И.А. Оптические информационные технологии. Спектральное представление сигналов 36

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Гридин С.В. Влияние скоростного режима непрерывной разливки на изменение напряженно-деформированного состояния круглых заготовок 45

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Симоненко А.П., Собко А.Ю., Артемова И.А. Совершенствование технологии реагентной очистки сточных вод от твердых примесей 56

Степаненко Т.И., Вахрушева О.А. Исследование возможности предотвращения негативных последствий антропогенного воздействия на поверхностные водоемы 68

Горожанкин С.А., Савенков Н.В. Оптимизация режимов работы силового агрегата автомобиля в городском цикле 73

Правила для авторов 79

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997

Series G: Technical science

No 1

Donetsk 2019

CONTENTS

INSTRUMENT ENGINEERING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Pometun E., Belousov V., Bolonov N., Lebedev V.* Study of dynamic characteristics at the thermometer based on NTC – termistor 3

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Babicheva M., Koltunov K., Yanovsky A.* Features of hardware attacks in wireless networks 9
- Shelekhova O., Kushchenko V., Popadin V.* Evaluation of the effect of ambient temperature on the reliability of banknote detector 17

COMPUTER SCIENCE AND COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

- Tretiakov I., Shalaev A., Danilov V.* Research methodology of acoustic element of spectral composition – decomposition of data of automated systems 24
- Babicheva M., Vereskun I.* MD5 cryptographic hash function vulnerability to the collision search attack 31
- Danilov V., Timchenko V., Tretiakov I.* Optical information technologies. Spectral representation of signals 36

INDUSTRIAL HEAT AND POWER ENGINEERING

- Gridin S.* Influence of the speed mode of continuous casting on change of the stressed-deformed state of the round purposes 45

ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN SERVICES

- Simonenko A., Sobko A., Artyomova I.* Perfection of reagent cleaning technology for sewage water from solid impurities 56
- Stepanenko T., Vahrusheva O.* Study of the possibility of prevention of negative sequence of anthropogenic exposure to surface water panel 68
- Gorozhankin S., Savenkov N.* Optimization of the operating modes of the vehicle power unit in the urban cycle 73
- Instructions for authors 79

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 53.088

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОМЕТРА НА ОСНОВЕ NTC – ТЕРМИСТОРА

© 2019 *Е.Д. Пометун, В.В. Белоусов, Н.И. Болонов, В.Н. Лебедев*

В статье приводятся результаты определения постоянной времени термометра сопротивления, с NTC – термистором Epcos G550 в качестве чувствительного элемента. В качестве методов исследования предлагаются методы численного и экспериментального моделирования.

Ключевые слова: лабораторный комплекс, динамические характеристики, термопреобразователь.

Введение. Получение достоверных результатов измерений параметров нестационарных потоков возможно с учетом, не только статических, а так же и динамических характеристик средств измерений (ДХ СИ) [1]. Как правило, в технической документации, приводятся значения ДХ СИ при каком-то фиксированном параметре, например, при скорости потока равной нулю [2]. Исследования показывают, что быстроедействие датчика зависит от внешних условий и игнорирование этого явления значительно ухудшает динамические свойства измерительных систем. Это относится к подавляющему большинству, применяемых в науке и технике измерителей, например, термометры и термопары. В то же время, в нормативно-технической документации практические аспекты этой задачи представлены недостаточно полно и нуждаются в более детальной проработке, как в методологии, так и в части технического обеспечения динамических измерений [3].

Целью данной работы является определение динамических характеристик термометра сопротивления, с термистором *Epcos G550*, в качестве чувствительного элемента путем экспериментального и численного моделирования и сравнение полученных результатов. Выбор термисторов *Epcos G550* обусловлен временной стабильностью и хорошей повторяемостью градуировочных коэффициентов.

Основная часть. Системы автоматического управления (САУ) функционируют под действием управляющих и возмущающих сигналов. Для правильного проектирования САУ и уже на этапе разработки технического задания необходимо учитывать условия работы СИ и согласовывать ДХ измерительных преобразователей с параметрами физических процессов, действующих на систему.

В данной работе, выполнялось исследование ДХ термометра сопротивления, с термистором *Epcos G550*, в качестве чувствительного элемента, путем воздействия ступенчатого испытательного сигнала (функции Хэвисайда) прямым методом, который реализован путем физического воздействия сигнала на датчик. Вторым методом определения динамических характеристик - метод численного моделирования, позволяющий не только подробно исследовать процесс, но и обнаружить неизвестные аспекты в период моделирования. В ходе выполнения работы сформулирована математическая модель, разработаны вычислительный алгоритм и программный

продукт расчета теплофизических процессов в системе сложный датчик – окружающая среда, позволяющие определить тепловую обстановку в системе в зависимости от скорости набегающего потока воздуха.

Для успешной разработки конструкций средств измерений температуры со сложными датчиками необходимо учитывать тепловую обстановку в системе – окружающая среда. Малые размеры датчика ($\varnothing \leq 1,5$ мм) не позволяют получить экспериментально распределение тепловых потоков, поэтому применяется математическое моделирование, при котором учитывается нелинейность процессов.

Датчик представляет собой стеклянный цилиндр с расположенными в нем чувствительным элементом (ЧЭ) и токопроводящими проводами (рис.1). ЧЭ нагреет до постоянной температуры 120°C и прогревает провода и стеклянную оболочку.

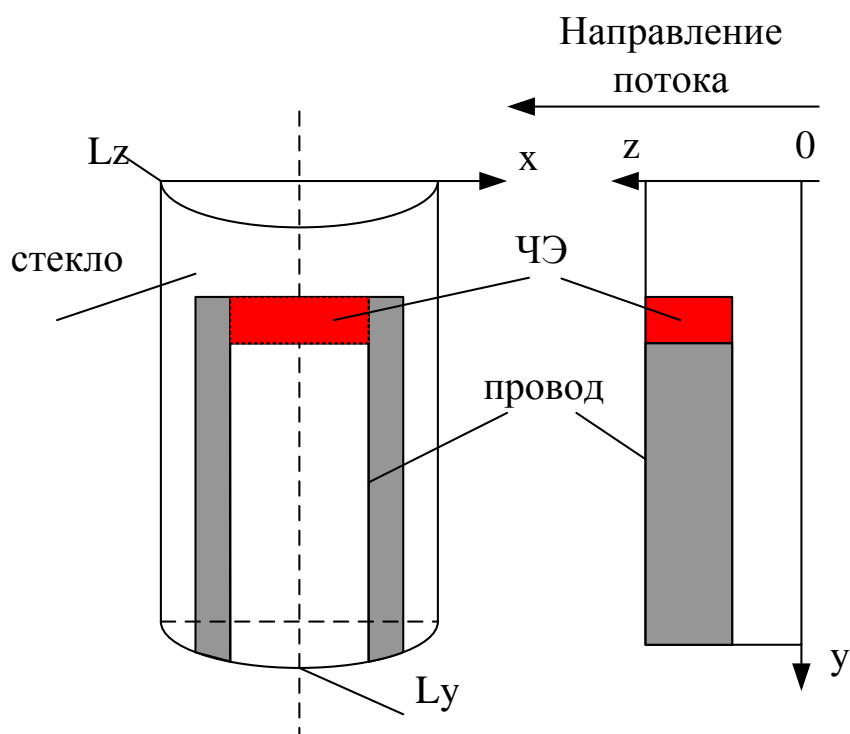


Рис. 1. Пространственная схема области (а), проекция на плоскость yz – (б)

Теплофизические процессы в системе датчик – провод – стекло – окружающая среда, описываются уравнением теплопереноса соответствующими краевыми условиями [4].

При решении многих задач переноса сплошной среды невозможно применить аналитические методы к системе дифференциальных уравнений в частных производных, что обусловлено нелинейностью и многомерностью. Наиболее приемлемым методом решения уравнений переноса, является метод конечных разностей (метод сеток). Сущность его состоит в том, что область непрерывного изменения аргумента заменяется конечным дискретным множеством точек (узлов), образующих пространственно-временную разностную сетку [5].

При построении разностной сетки, следует учитывать конфигурацию расчетной области, особенности выбранной системы координат. Число узлов в сеточной области определяются требованиями к точности решения в соответствии с техническими возможностями ЭВМ. Запишем пространственно-временную разностную сетку следующим образом:

$$\omega_\tau = \sum_{n=0}^N \tau_n; n = 0, 1, 2, \dots, N;$$

$$\omega_h = \begin{cases} x = \sum_{i=0}^I h_i; i = 0, 1, 2, \dots, I; \\ y = \sum_{j=0}^J h_j; j = 0, 1, 2, \dots, J; \\ z = \sum_{k=0}^K h_k; k = 0, 1, 2, \dots, K. \end{cases}, \quad (1)$$

где τ_n, h_i, h_j, h_k – соответственно шаги по времени и по пространству.

Введем неравномерную сетку x_i, y_i, z_k в которой $i = 1, 2, \dots, I, j = 1, 2, \dots, J, k = 1, 2, \dots, K$. Обозначим через $h_i = x_i - x_{i-1}, h_j = y_j - y_{j-1}, h_k = z_k - z_{k-1}$, шаги сетки в направлении координат x, y и k соответственно. Тогда размеры ячейки разностной сетки вычисляются как: $\dot{h}_i = 0,5(x_{i+1} - x_{i-1}), \dot{h}_j = 0,5(y_{j+1} - y_{j-1}), \dot{h}_k = 0,5(z_{k+1} - z_{k-1})$.

Теплофизические процессы в системе датчик – провод – стекло – окружающая среда, описываются уравнением теплопереноса:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} a \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} a \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} a \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (2)$$

где T – текущая температура, t – текущее время, x, y, z – текущие координаты, a – коэффициент температуропроводности, который меняется от вида материала: для стекла a_c , для датчика a_d и для провода a_n .

Для оценки адекватности сформулированной модели проведено сравнение результатов численного моделирования и экспериментальных данных. Для проверки адекватности модели были проведены сравнения численного и лабораторного исследования остывания ЧЭ в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 10 \div 1000$.

В Донецком национальном университете для определения переходной характеристики [6] прямым методом разработан и изготовлен аэродинамический стенд, создающий стратифицированный воздушный поток, описанный в следующих работах [6, 7]. Измерения переходной характеристики выполнялись следующим образом. В центре верхнего канала аэродинамического стенда, размещался термистор, подключенный к электронному термометру. В верхней страте устанавливалась температура, равная 65°C , в нижней страте температура потока была равна комнатной. Скорость потока, в верхней и нижней стратах, устанавливалась идентичной и варьировалась от $0,1\text{ м/с}$ до 10 м/с , для различных режимов измерений.

По команде оператора, с помощью координатного устройства, датчик скачкообразно перемещался из верхней страты в нижнюю. При этом, температура потока, обтекающего датчик изменялась от 65°C до комнатной (20°C). Выходной сигнал термометра подавался на коммутатор, фирмы National Instruments и по выбранному каналу - на АЦП. Выходной сигнал от термопреобразователя регистрировался с временным интервалом $0,01$. Такой же процесс применялся при математическом моделировании.

Окно программы LabVIEW с примером экспериментальной нормированной переходной характеристики $h(t)$ термистора в режиме работы термометра при скорости 3м/с в верхней и нижней страте, представлено на рисунке 2.

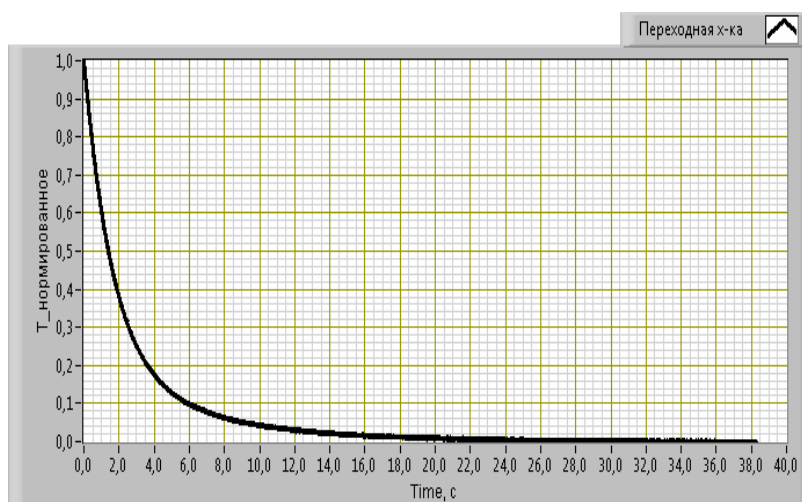


Рис. 2. Окно виртуальной лаборатории LabVIEW

Обработка полученных данных выполнялась в среде LabVIEW следующим образом. Вначале рассчитывалась температура термистора по соотношению:

$$T = \left(\frac{B \cdot T_0}{B + T_0 \cdot \ln\left(\frac{R_t}{T_0}\right)} \right) - 273.15, \quad (3)$$

где B – градуировочный коэффициент, T – температура, R_0 – сопротивление термистора при T_0 , R_t – сопротивление термистора при текущей температуре, T_0 – номинальная температура (25°C).

Далее, полученная переходная характеристика нормировалась в соответствии с ГОСТ 8.009. В общем случае, аналитическое представление переходной характеристики может быть выполнено в виде суммы нескольких экспонент (решение дифференциального уравнения n -го порядка) [3]. В простейшем случае инерционные свойства датчика описываются с помощью дифференциального уравнения первого порядка. Переходная характеристика, представляющая собой решение дифференциального уравнения 1 –го порядка для типового единичного входного сигнала, определяется следующим выражением:

$$h(t) = K \cdot \left(1 - e^{-t/\tau} \right), \quad (4)$$

где τ – постоянная времени системы; t – время.

Постоянная времени τ определялась как решение системы уравнений:

$$\begin{cases} y_1(t) = k \cdot t + c; \\ y_2(t) = 0.63. \end{cases}, \quad (5)$$

При этом число точек, используемых для аппроксимации линейной функции, не превышало 10.

На рисунке 3 представлены зависимости постоянных времени термометра сопротивления при экспериментальном и численном моделировании.

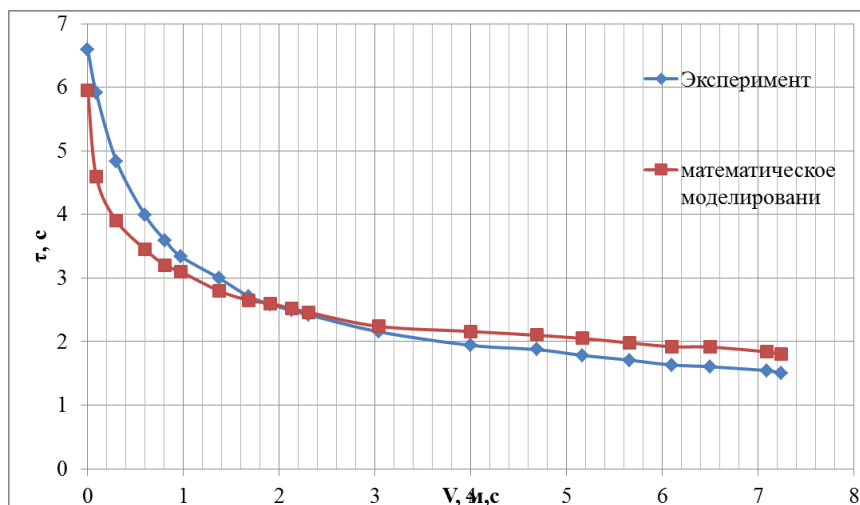


Рис. 3. Сравнение численного моделирования с экспериментом

Как видно из графика, постоянная времени τ с увеличением скорости V уменьшается и имеет экспоненциальный вид. Причем, постоянные времена, полученные при экспериментальном моделировании до 2 м/с больше на 10 %, чем постоянные времена при математическом моделировании. При скорости 2,2 м/с экспериментальная картина изменяется: постоянные времена, полученные с использованием численных методов больше, примерно на 10%, чем постоянные времена, полученные при экспериментальном моделировании.

Такое отличие можно объяснить следующими причинами:

- погрешностью в геометрии датчика, задаваемой математической моделью;
- неточность задания теплофизических параметров датчика;
- неточное задание граничных условий на нижнем срезе датчика.

Вместе с тем уточнение математической модели даст более адекватное отображение теплообменных процессов в системе сложный датчик – окружающая среда и может лечь в основу разработки общей системы расчета и оценки теплофизических и гидродинамических процессов сложных датчиков. Т.о., погрешности измерения мгновенных значений температуры определяются не только конструкцией и размерами термистора, а так же теплофизическими свойствами и условиями теплообмена датчика со средой [8].

Выводы. Динамические характеристики термометров, использующих в качестве ЧЭ NTC - термисторы, с некоторыми ограничениями, могут быть определены численными методами. Полученные результаты имеют практическое применение, в частности, при разработке методик контроля состояния термопреобразователя без его демонтажа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МИ 2090-90 Государственная система обеспечения единства измерений(ГСИ).Определение динамических характеристик аналоговых СИ с сосредоточенными параметрами [Введ. 01.01.90]. - Москва: Издательство стандартов, 1990.- 34с.

- ГОСТ 8.256 - 77. Государственная система обеспечения единства измерений(ГСИ). Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения. - [Введ. 01. 07. 78.]. – Москва: Издательство стандартов, 1977. – 11 с.
- Соловьев В.А. Проблемы управления полетами пилотируемых космических комплексов/ В.А.Соловьев, В.Е.Любинский //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана.- 2013. -№ 3. -С. 39-52. (Серия «Машиностроение»)
- Ростовская Д.А. Расчет теплообмена в системе сложный датчик окружающая среда/ Д.А. Ростовская, В.В. Белоусов, Ю.Д. Украинский //Доклады “Международной научно-методичной конференции”.- Днепродзержинск, 2006.- Б.с.
- Самарский А.А. Теория разностных схем/ А.А. Самарский. -Москва: «Наука», 1989.- 615с.
- Пат. 95326 U. Україна, МПК G01P 21/00, G01K 15/00. Спосіб прямого визначення динамічних характеристик термоперетворювачів / М.І. Болонів, Д.А.Чупіс, Д.М. Кузнецов; заявник і патентовласник Донецький національний університет. – № u201405589; заявл. 26.05.2014; опубл. 25.12.2014, Бюл. № 24.-3с.
- Пометун Е.Д. Моделирование функции Хэвисайда в рабочей части аэродинамической трубы/ Е.Д. Пометун, Н.И. Болонив, В.В. Белоусов, В.Н. Лебедев// Сборник статей 9-й международной научно-практической конференции «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения».- Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2016.- 267-269 с.
- Украинский Ю.Д. Аппроксимация степенной функцией теплоотдачи термистора в режиме датчика термоанемометра постоянной температуры/ Ю.Д. Украинский//Тезисы докладов.- Мелекино, 2002. – С.3

Поступила в редакцию 19.02.2019 г.

STUDY OF DYNAMIC CHARACTERISTICS AT THE THERMOMETER BASED ON NTC – THERMISTOR

E. Pometun, V. Belousov, N. Bolonov, V. Lebedev

The article presents the results of determining the time constant of a resistance thermometer, with an NTC thermistor Epcos G550 as a sensitive element. As methods of research methods of numerical and experimental modeling are proposed.

Keywords: laboratory complex, dynamic characteristics, thermistor.

Пометун Екатерина Дмитриевна

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

E-mail: alternativa19031992@rambler.ru

Белоусов Вячеслав Владимирович

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

Болонив Николай Иванович

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

Лебедев Владимир Николаевич

старший преподаватель, заведующий лабораторией на кафедре физики неравновесных процессов метрологии и экологии им. И.Л. Повха ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.

Pometun Katerina

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

Belousov Vyacheslav

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

Bolonov Nikolay

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

Lebedev Vladimir

Head of Laboratory at the Department of Physics of Nonequilibrium , Metrology and Ecology named after I.L. Povkha of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

УДК 629.052.3

ОСОБЕННОСТИ АППАРАТНЫХ АТАК В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ

© 2019 М.В. Бабичева, К.В. Колтунов, А.В. Яновский

Проведен сравнительный анализ двух видов аппаратных атак типа «человек посередине», с использованием генератора помехи и модуля деаутентификации клиента в широкополосных беспроводных сетях, предоставляющих доступ в Интернет и сопутствующих услуг для конечных пользователей. Показано, что беспроводные сети на основе стандартов IEEE 802.11, которые используют общие радиочастоты, могут быть уязвимы к атакам этого типа. Предложены методы защиты от подобных атак.

Ключевые слова: аппаратные атаки, беспроводные сети, wi-fi, фальшивая точка доступа, деаутентификация, beacon атака.

Введение. Большинство современных устройств запоминают название Wi-Fi сети, к которой они успешно подключались хотя-бы один раз, и сразу же соединяются с ней, если «обнаружат» её в беспроводном эфире. Эту особенность беспроводных технологий всё чаще используют злоумышленники — создают поддельную точку доступа, одновременно проводя DOS атаку на сетевое устройство, к которому подключилась «жертва». При настройке беспроводного адаптера на автоматическое подключение к известным беспроводным сетям пользователь подвергает себя риску стать жертвой атаки «человек посередине» (man in the middle) [1]. Злоумышленник может создать свою Wi-Fi точку доступа, с таким же именем. В результате либо клиентское устройство автоматически подсоединится к такой точке доступа, либо клиент сам подсоединится к фальшивой точке доступа и будет работать через нее, а атакующий получит возможность перехватывать весь трафик своей жертвы, либо атаковать устройство, находящееся с ним в одном сегменте сети. Такого рода атакам часто подвергаются пользователи бесплатных беспроводных сетей в общественных местах (кафе, вокзалах, аэропортах, отелях). Особенностям проведения подобных атак с использованием различных методов DOS атак на доверенное сетевое устройство посвящена данная работа [2-3].

Портативный подавитель диапазона 2.4-2.485 ГГц, для осуществления DOS атаки на физическом уровне. Оборудование стандарта IEEE 802.11 использует нелицензированный диапазон частот. Оборудование IEEE 802.11b/g использует 14 каналов по 5 МГц в диапазоне частот от 2.412 ГГц до 2.484 ГГц. Любая помеха в данном диапазоне нарушит радиосвязь между устройствами IEEE 802.11 и приведет к отказу в обслуживании. Мощность бытовых WIFI роутеров может составлять порядка 100 мВт. Для успешного проведения атаки, источник помех должен сгенерировать сигнал, достаточно мощный, способный подавить основные частоты [4].

На рисунке 1 представлена схема генератора помех диапазона 2.4-2.485 ГГц. На транзисторе T1 собран генератор частоты с возможностью частотной модуляции посредством варикапа, включенного в частотоподающую цепь. Для усиления относительно малого сигнала с генератора используется предварительный усилитель на транзисторе T2. В качестве оконечного усилителя был выбран СВЧ усилитель SGA-

6589. Для блокировки высокой частоты и фильтрации по питанию использовались конденсаторы разных номиналов, включенные группами возле каскадов.

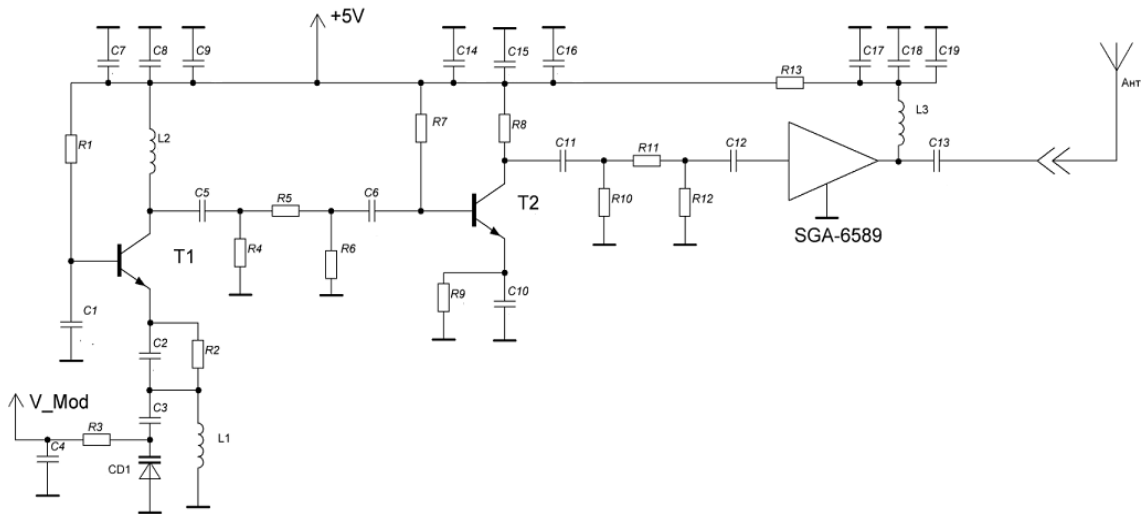


Рис. 1. Принципиальная схема генератора помех диапазона 2.4-2.485ГГц

Схема генератора модулирующего сигнала для блока СВЧ, представлена на рисунке 2. Источником треугольного напряжения служит генератор на логических элементах 2И-НЕ, на схеме DD1.2DD1.3. Напряжение, с выводов 1,2 микросхемы попадает на инвертирующий усилитель на логическом элементе, охваченном отрицательной обратной связью DD1.4, коэффициент усиления которого определяется отношением сопротивления резисторов R11/R10. Подстроечный резистор R12 регулирует полосу перекрытия постановщика помехи. В модулирующий сигнал подмешивается шумовая составляющая относительно малой амплитуды.

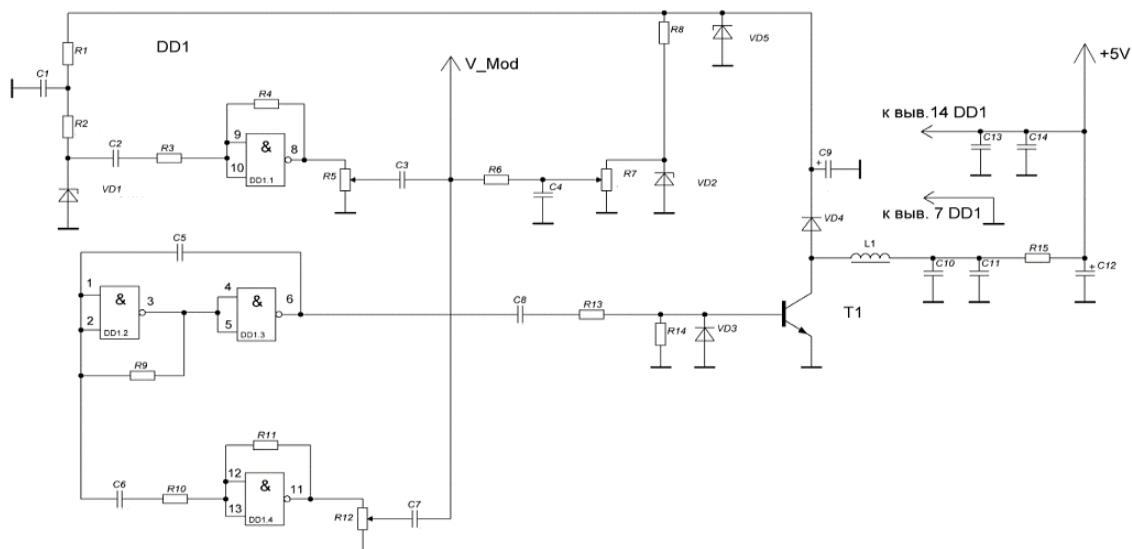


Рис. 2. Схема генератора модулирующего сигнала

В качестве источника шума выступает стабилитрон VD1, работающий при малом токе. Шумовой сигнал поступает на усилитель на логическом элементе. Резистор R5 регулирует амплитуду шумового напряжения в модулирующем сигнале. Генератор в сборке имеет относительно небольшие размеры (60x100 мм.). В корпус вмонтирована антенна от роутера типа TP-LINK, которая имеет усиление порядка 5dB, и рассчитана на работу в заданном диапазоне. Внешний вид и спектр выходного сигнала (измерения проводились на анализаторе спектра Agilent E4407B) представлен на рисунке 3.

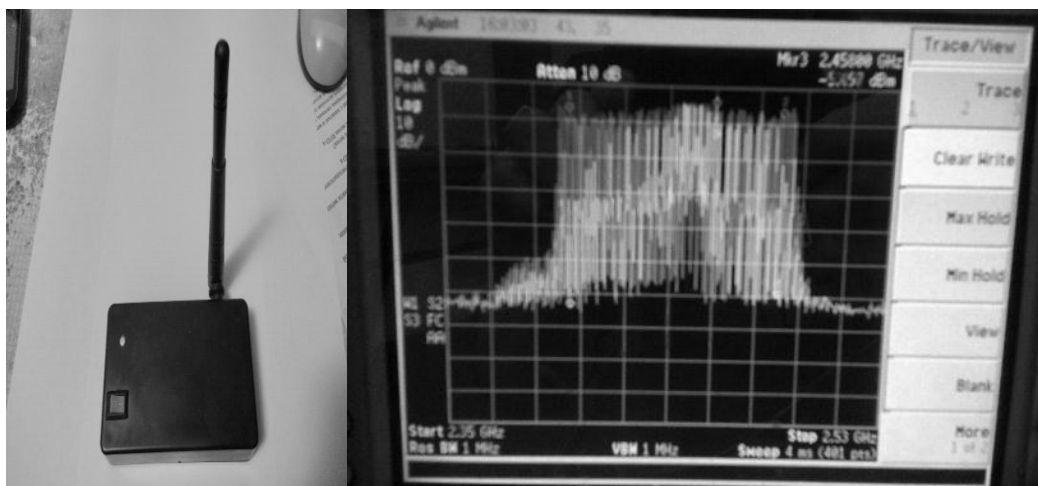


Рис. 3. Внешний вид и спектр выходного сигнала генератора

Аппаратный модуль-деаутентификатор на ESP8266. В отличие от генераторов шума, который заглушает сигнал передатчика wi-fi своим более сильным сигналом, деаутентификатор работает на программном уровне. Протокол 802.11 WiFi содержит функцию деаутентификации, которая используется для отключения клиентов от сети [5-6]. Злоумышленник отправляет кадры деаутентификации с поддельным адресом источника для точки беспроводного доступа. Протокол не требует никакого шифрования для таких кадров. Злоумышленнику не нужно быть в сети или знать пароль. Для подобных атак используется микроконтроллер ESP8266 со встроенным Wi-Fi, на миниатюрной плате с поддержкой программной платформы NodeMCU (рис.4). ESP8266, реализует работу с Wi-Fi по стандарту 802.11 b/g/n на частоте 2,4 ГГц.

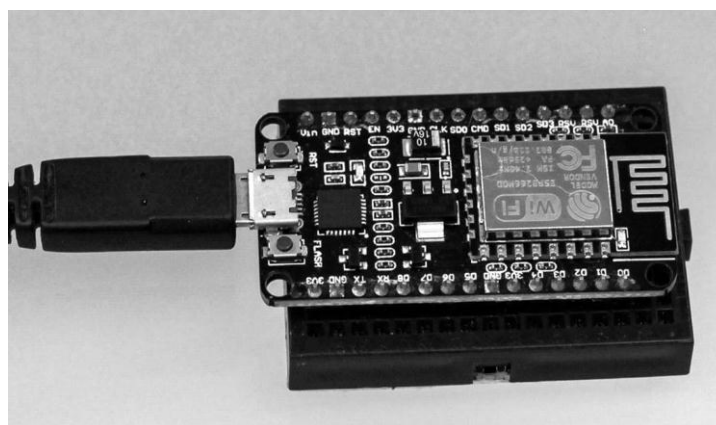


Рис. 4. Внешний вид модуля NodeMCU ESP8266

После включения модуль создает точку доступа, к которой можно подключиться по адресу 192.168.4.1. Происходит сканирование доступных беспроводных сетей. Нужная точка доступа выбирается в меню (рис.5).

Ch	SSID	RSSI	Encrypt.	Select
4	* Hidden SSID *	-36	WPA*	select
4	DESKTOP-PKRSRS2Q 6762	-47	WPA2	deselect
11	privat.donnu.ru	-83	none	select
11	open.donnu.ru	-83	none	select
6	office.donnu.ru	-84	none	select
10	Lenovo A7000	-84	none	select
11	office.donnu.ru	-84	none	select
1	open.donnu.ru	-85	none	select
1	privat.donnu.ru	-85	none	select
6	privat.donnu.ru	-85	none	select
6	open.donnu.ru	-85	none	select
6	* Hidden SSID *	-89	WPA2	select
1	office.donnu.ru	-90	none	select
1	open.donnu.ru	-91	none	select
1	open.donnu.ru	-91	none	select
1	privat.donnu.ru	-92	none	select

Рис. 5. Выбор беспроводной сети для атаки

Есть возможность выбрать несколько типов атаки (рис.6). Death – атака деаутентификации, модуль отключает все устройства от выбранной сети забрасывая их широковещательными запросами. Режим beacon позволяет создавать одновременно до 60 точек доступа. Можно создать случайные имена либо задавать имена вручную. В разделе SSIDs создаются точки доступа для атаки beacon.

Attack	Status	Start/Stop
death	20pkts/s	stop
beacon (clone)	ready	start
beacon (list)	no SSID	start
probe request	no SSID	start

Рис. 6. Выбор типа атаки

Методика и результаты эксперимента. Для исследования был выбран популярный роутер TP-Link TL-WR841N, который раздавал wi-fi по скрытой сети, с SSID «Student», источниками атаки служили генератор помехи на 2,4 ГГц и модуль деаутентификатор на ESP8266, фальшивая точка доступа создавалась на мобильном телефоне Xiaomi Mi8. Схема расположения устройств представлена на рисунке 7.

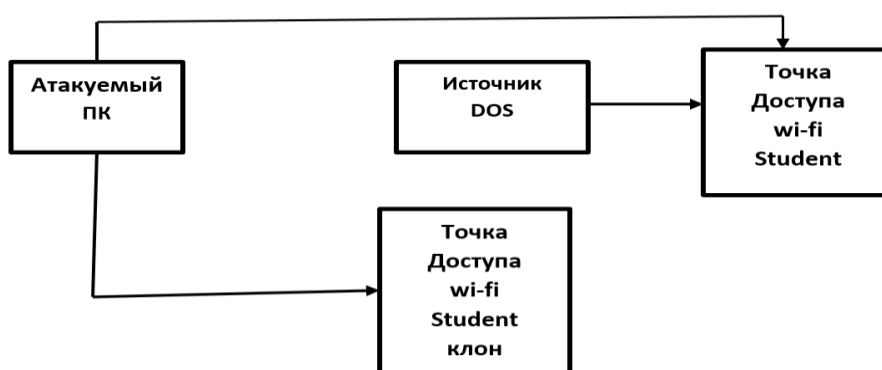


Рис. 7. Схема расположения оборудования для эксперимента

В случае использования в качестве источника DOS атаки генератора шума, на ПК «жертвы» пропадали все возможные для подключения точки доступа. При этом генератор размещался в различных позициях по отношению к роутеру, на расстоянии от роутера до 5 м, и за стеной толщиной 45 мм. Результаты представлены на рисунке 8.

Необходимым условием для появления фальшивой точки доступа является то, что источник wi-fi сигнала должен быть расположен к ПК «жертвы» ближе, чем роутер и генератор шума. При этом фальшивая точка доступа Student4G идентифицируется, как открытая сеть. Название «Student4G» было дано специально, поскольку во многих публичных местах, аэропортах, вокзалах, кафе часто присутствуют такие открытые «клоны» основных точек доступа, с повышенной скоростью передачи данных, к которым большинство посетителей с радостью подключаются. Подозрительным для «жертвы» в данном случае является отсутствие каких-либо других источников wi-fi, которых в городских условиях обычно находится несколько. К такой сети можно подключиться либо если у «жертвы» включён режим автоматического подключения, либо по невнимательности, в незнакомом месте.

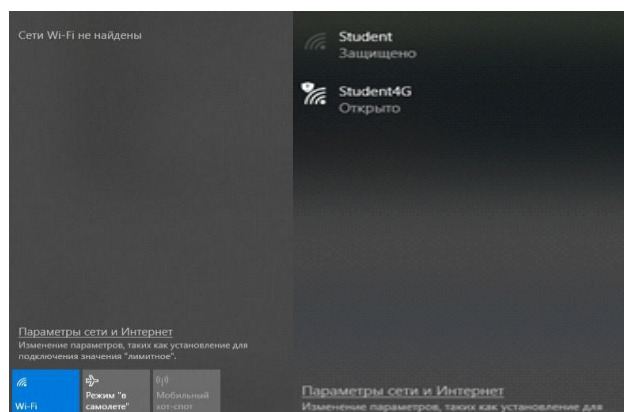


Рис. 8. Слева- при включении генератора шума исчезли все точки доступа, справа – включена фальшивая точки доступа

Генератор шума имеет небольшие размеры, и его присутствие можно легко скрыть, так же, как и источник фальшивой точки доступа – мобильный телефон. При включении модуля-деаутентификатора, картина совсем другая (рис. 9).

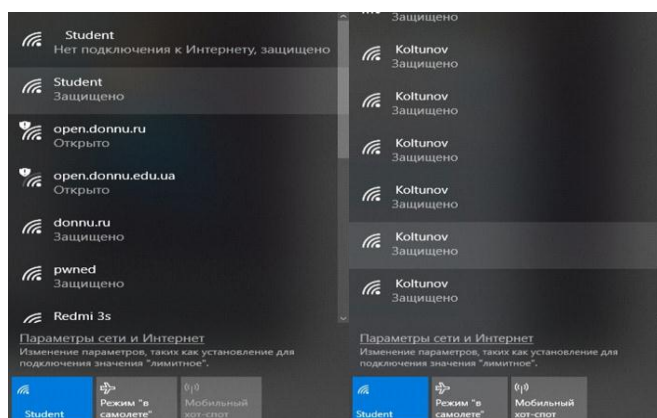


Рис. 9. Слева- при включении модуля-деаутентификатора отключилась точка доступа «Student» и появилась фальшивая точка доступа с таким же BSSID, справа – появилось 20 фальшивых точек доступа «Koltunov»

Слева представлены результаты атаки деаутентификации, когда клиенту отсылается большое количество кадров деаутентификации и он не может подключиться, а роутеру, а подключается к фальшивой точка с таким же BSSID. При этом количество пакетов, принимаемых клиентом резко возрастает, что хорошо заметно, при включении анализатора трафика Wireshark (рис.10).

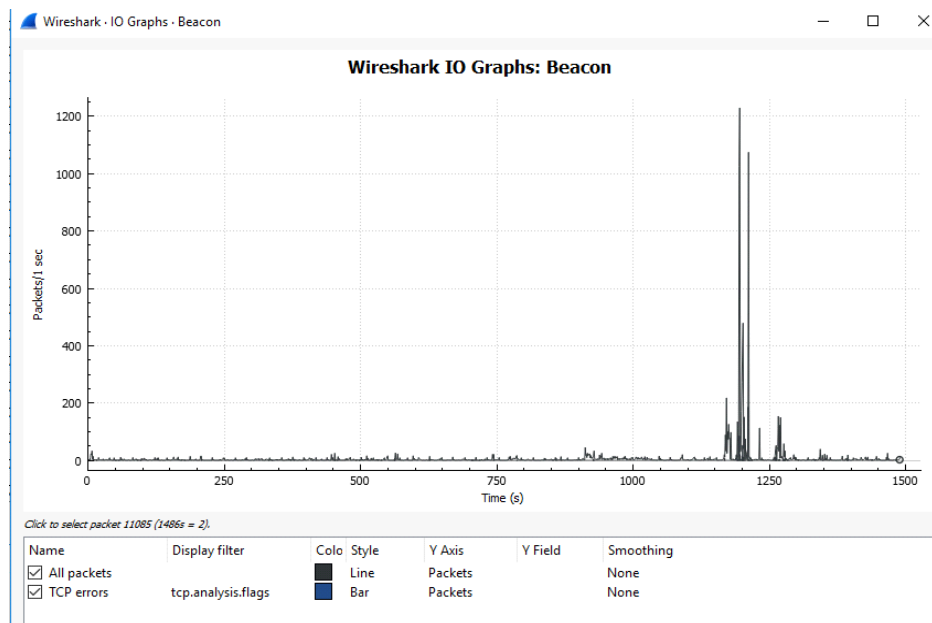


Рис. 10. В момент атаки резко возрастает количество принимаемых сетевых пакетов

При пинговании роутера с ПК «жертвы» либо не проходит ни один из четырех пакетов, либо проходит один из четырех. В это время роутер передает множество широковещательных ARP запросов, пытаясь установить связь с компьютером «жертвы» (рис. 11). Такая картина указывает на наличие аномалий в сети.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
7825	491.020967	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7826	492.040999	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7831	493.074314	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7857	495.015214	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7862	496.034757	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7887	497.068598	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7890	498.087255	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7891	499.008795	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7892	500.029520	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7899	502.080884	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7928	503.101538	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7939	504.134792	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7940	505.153498	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7941	506.075251	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7975	511.088680	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
7976	512.121933	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
8002	513.141062	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
8044	515.083039	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
8060	516.114781	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1
8078	517.037014	Tp-LinkT_cf:f4:90	Broadcast	ARP	42	Who has 192.168.1.102? Tell 192.168.1.1

> Frame 136: 92 bytes on wire (736 bits), 92 bytes captured (736 bits) on interface 0
 > Ethernet II, Src: Azurewav_13:50:b3 (80:a5:89:13:50:b3), Dst: Broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff)
 > Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.1.100, Dst: 192.168.1.255

Рис. 11. Количество широковещательных запросов роутера возрастает в момент атаки

Если поставить фильтр по типам пакетов 0x00c и 0x00a (деаутентификации и диссоциации), то можно увидеть, что их также достаточно много, причем не только на ip роутера, но и на другие адреса.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
11881	1483.893354	192.168.1.104	173.194.222.188	TCP	55	[TCP Keep-Alive] 64077→5228 [ACK] Seq=758 Ack=4479 Win=17152 Len=1
10983	1438.851678	192.168.1.104	173.194.222.188	TCP	55	[TCP Keep-Alive] 64077→5228 [ACK] Seq=758 Ack=4479 Win=17152 Len=1
10850	1393.814159	192.168.1.104	173.194.222.188	TCP	55	[TCP Keep-Alive] 64077→5228 [ACK] Seq=758 Ack=4479 Win=17152 Len=1
10728	1348.812649	192.168.1.104	173.194.222.188	TCP	55	[TCP Keep-Alive] 64077→5228 [ACK] Seq=758 Ack=4479 Win=17152 Len=1
10645	1334.817344	192.168.1.104	69.16.175.10	TCP	55	[TCP Keep-Alive] 64133→443 [ACK] Seq=1286 Ack=1710 Win=17408 Len=1
10644	1334.811973	192.168.1.104	69.16.175.10	TCP	55	[TCP Keep-Alive] 64132→443 [ACK] Seq=1092 Ack=1328 Win=16128 Len=1
10606	1303.775387	192.168.1.104	173.194.222.188	TCP	55	[TCP Keep-Alive] 64077→5228 [ACK] Seq=758 Ack=4479 Win=17152 Len=1
9580	1258.740244	192.168.1.104	173.194.222.188	TCP	55	[TCP Keep-Alive] 64077→5228 [ACK] Seq=758 Ack=4479 Win=17152 Len=1
9390	1217.047214	192.168.1.104	173.194.222.94	TCP	55	[TCP Keep-Alive] 64079→443 [ACK] Seq=1018 Ack=146155 Win=245584 Len=1
9365	1214.026422	192.168.1.104	64.233.165.94	TCP	55	[TCP Keep-Alive] 64078→443 [ACK] Seq=998 Ack=4762 Win=16640 Len=1
9363	1213.698873	192.168.1.104	173.194.222.188	TCP	55	[TCP Keep-Alive] 64077→5228 [ACK] Seq=758 Ack=4479 Win=17152 Len=1
4896	1195.807473	69.16.175.10	192.168.1.104	TCP	1514	443→64087 [ACK] Seq=105581 Ack=1761 Win=29696 Len=1460
3189	1168.698671	173.194.222.188	192.168.1.104	TCP	181	5228→64077 [PSH, ACK] Seq=4352 Ack=759 Win=62976 Len=127
3187	1168.697988	173.194.222.188	192.168.1.104	TCP	166	5228→64077 [PSH, ACK] Seq=4240 Ack=759 Win=62976 Len=112
3180	1168.695501	173.194.222.188	192.168.1.104	TCP	77	5228→64077 [PSH, ACK] Seq=4217 Ack=759 Win=62976 Len=23
3172	1168.657435	192.168.1.104	173.194.222.188	TCP	231	64077→5228 [PSH, ACK] Seq=582 Ack=4217 Win=16128 Len=177
3164	1168.373868	173.194.222.188	192.168.1.104	TCP	544	5228→64077 [PSH, ACK] Seq=3727 Ack=582 Win=61952 Len=490
3162	1168.333179	192.168.1.104	173.194.222.188	TCP	118	64077→5228 [PSH, ACK] Seq=518 Ack=3727 Win=16640 Len=64
3159	1168.326844	173.194.222.188	192.168.1.104	TCP	920	5228→64077 [PSH, ACK] Seq=2861 Ack=518 Win=61952 Len=866

Рис. 12. Количество широковещательных запросов роутера возрастает в момент атаки

Таким образом в ходе экспериментов были проведены 3 типа аппаратной DOS атаки на wi-fi которые могли бы завершиться успешно в случае автоматического подключения клиента к точке доступа или если клиент проявил бы невнимательность. Наличие атаки можно зафиксировать при помощи sniffера. Кроме того, наличие точек доступа-клонов может озадачить внимательного пользователя. Однако при проведении атаки beacon, названия точек доступа можно менять по своему усмотрению и симитировать большое количество фальшивых точек доступа с различными SSID.

Методы защиты. И генератор шума и NodeMCU — это дешевые, компактные и доступные устройства, следовательно, кто угодно может повторить весь проект без особых усилий.

Можно предложить следующие методы защиты: включить «подтверждение подключения» даже к известным сетям; проводить мониторинг эфира для выявления аномалий; не использовать критично-важные программы (например, банк-клиент) в открытых сетях.

Большинство популярных роутеров используют стандарты IEEE 802.11b/g/n, которые подвержены глушению. Роутеры с поддержкой стандарта 802.11w, менее уязвимы к подобным атакам. Чтобы эффективно предотвратить атаку деавторизации, и клиент, и точка доступа должны поддерживать стандарт 802.11w с защищенными кадрами управления. В некоторых моделях роутеров есть защита от спама, которая работает как с подключенными к сети устройствами, так и с неподключенными. Что же касается подавления на физическом уровне, то защититься от него возможно экранированием помещения, что неприемлемо в общественных местах. В любом случае нужно быть предельно внимательным при подключении к беспроводным сетям.

Выводы. В случае сети Wi-Fi отследить источник атаки «man in the middle», крайне сложно, поскольку его местоположение ограничивается лишь зоной покрытия. Как показало данное исследование злоумышленник может нарушить безопасность беспроводной сети, используя несложные доступные устройства. Аппаратные DOS

атаки как с использованием генератора диапазона 2.4-2.485ГГц, так и модуля аутентификации NodeMCU ESP8266 позволяют заблокировать подключение клиента к аутентичной точке доступа, в то время как злоумышленник создает свою фальшивую точку доступа, предлагая подключиться к ней. Пользователям необходимо знать о такого рода уязвимостях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов А. В. Анализ атак на беспроводные компьютерные интерфейсы / А. В. Морозов, В. Г. Шахов // Омский научный вестник. – 2012. – Вып. № 3 (113). – С. 323-327.
2. Асяев Г. Д. Атаки на канальный уровень / Г. Д. Асяев, К. Ю. Никольская // Вестник УРФО. Безопасность в информационной сфере. – 2015. – № 1 (15). – С. 27-29.
3. Raymond D. R. Denial of service in wireless sensor networks: attacks and defences / D. R. Raymond, S. F. Midkiff // IEEE Security and Privacy. – 2008. – Vol. 7, № 1. – P. 74-81.
4. Law Y. W. EnergyEfficient LinkLayer Jamming Attacks against Wireless Sensor Network MAC Protocols / Y. W. Law [et al.] // ACM Transactions on Sensor Networks. – 2009. – 5 (1). – P. 6.
5. Awerbuch B. A jamming-resistant MAC protocol for single-hop wireless networks / B. Awerbuch, A. Richa, C. Scheideler // 27th ACM SIGACT-SIGOPS Symposium on Principles of Distributed Computing : Proceedings, Aug 18 2008 – Aug 21 2008. – Toronto, 2008. – P. 45-54.
6. Abdesselam F. N. Detecting and avoiding wormhole attacks in wireless Ad hoc networks / F. N. Abdesselam, B. Bensaou, T. Taleb // IEEE Communication Magazine. – 2008. – Vol. 46, Is. 4. – P. 127-133.

Поступила в редакцию 27.02.2019 г.

FEATURES OF HARDWARE ATTACKS IN WIRELESS NETWORKS

M. Babicheva, K. Koltunov, A. Yanovsky

In the paper a comparative analysis of two types of man-in-the-middle hardware attacks using a noise generator and a client deauthentication module in broadband wireless networks was carried out. It is shown wireless networks based on IEEE 802.11 standards using common radio frequencies may be vulnerable to attacks of this type. Methods of protection against such attacks are proposed.

Keywords: hardware attacks, wireless networks, wi-fi, a fake access point, deauthentication, beacon attack.

Бабичева Маргарита Вадимовна

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

Babicheva Margarita

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

Колтунов Константин Викторович

студент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: 1997-don00@mail.ru

Koltunov Konstantin

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

Яновский Александр Вадимович

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

Yanovsky Alexander

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

УДК 621.3.019.3

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ДЕТЕКТОРА БАНКНОТ

© 2019 *О.Г. Шелехова, В.В. Кущенко, В.И. Попадин*

Выполнена оценка влияния температуры окружающей среды на показатели надежности детектора банкнот. Для повышения срока безаварийной эксплуатации в работе предложено выполнять замену отдельных комплектующих детектора банкнот на более надежные аналоги. Результаты исследования, выполненные в статье, могут быть использованы, как на этапе проектирования детектора денежных купюр, так и в условиях его эксплуатации.

Ключевые слова: безотказность, интенсивность отказов, модель расчета эксплуатационной интенсивности отказов, наработка на отказ, вероятность безотказной работы.

Введение. При проектировании радиоэлектронной аппаратуры исследованию надежности элементов ее конструкции уделяют особое внимание [1, 2], что особенно актуально для детекторов денежных купюр к которым предъявляются повышенные требования точности, качества и продолжительной безотказной работы [3].

Эксплуатация детектора банкнот требует безотказной работы в течение 10 лет [4], однако на практике срок их безаварийной работы не превышает 4–5 лет. Зачастую отказы детекторов банкнот связаны с отказом отдельных элементов их конструкции [1, 3, 7–13].

Значительный интерес представляет выявление факторов, влияющих на сокращение срока безаварийной эксплуатации детектора банкнот. Необходимо выявить составных частей детектора наиболее чувствительных к воздействиям температуры окружающей среды и т. п. Интерес представляет вопрос оценки надежности элементов конструкции детектора, с целью повышения времени безотказной эксплуатации прибора при минимальных финансовых затратах.

Целью данной статьи является оценка влияния температуры окружающей среды на показатели надежности детектора банкнот, разработка рекомендаций по повышению длительности его безаварийной эксплуатации.

Основная часть. Расчет надежности детектора денежных купюр был выполнен на примере модели «ДОРС–110», схема которой представлена на рис. 1.

В настоящее время основной характеристикой безотказности элементов, приводимой в справочной литературе, является эксплуатационная интенсивность отказов λ [7–17].

На практике условия работы детектора банкнот могут отличаться от номинальных, тогда эксплуатационную интенсивность отказов определяют [4–8]:

$$\lambda_{\ominus} = \lambda_{\ominus} \prod_{i=1}^m K_i, \quad (1)$$

где: m – количество факторов, принятых во внимание из числа влияющих на безотказность элементов; K_i – коэффициенты, учитывающие изменение эксплуатационной интенсивности отказов при различных условиях работы.

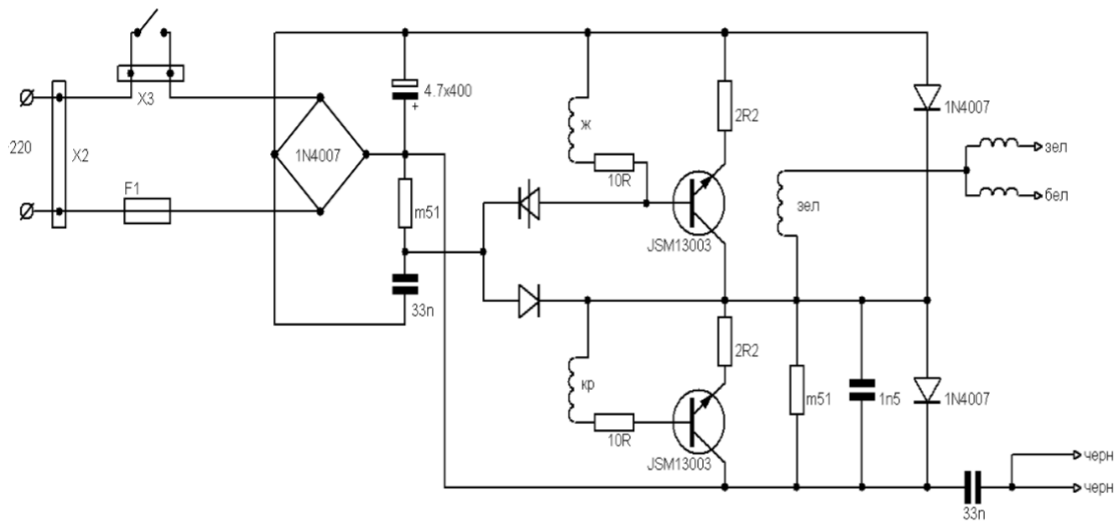


Рис. 1. Схема детектора денежных купюр «ДОРС-110»

Расчёт поправочных коэффициентов выполнен с использованием методики прогнозирования эксплуатационной безотказности элементов отечественного производств, представленной в работах Боровикова С. М. [7–9].

Для элементов схемы (рис. 1) модель для расчета эксплуатационной интенсивности отказов будет иметь вид [7–9]:

Полупроводниковый элемент:	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{P}} K_{\text{Ф}} K_{\text{Д}} K_{\text{И}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}};$
Резистор:	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{P}} K_{\text{R}} K_{\text{M}} K_{\text{Д}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}};$
Конденсатор:	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{P}} K_{\text{C}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}};$
Дроссель, катушка индуктивности, тиристор:	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{P}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}};$
Соединитель, предохранитель:	$\lambda_{\text{Э}} = \lambda_{\text{Б}} K_{\text{I}} K_{\text{Э}} K_{\text{П}},$

где: $\lambda_{\text{Б}}$ – базовая интенсивность отказов элементов данной группы;

K_{P} – коэффициенты, зависящий от электрической нагрузки;

K_{I} – коэффициент, зависящий от температуры корпуса;

$K_{\text{Ф}}$ – коэффициент, учитывающий функциональный режим работы прибора;

K_{U} – коэффициент, учитывающий напряжение питания;

$K_{\text{R}}, K_{\text{C}}$ – коэффициент, учитывающий сопротивление и емкость соответственно;

$K_{\text{Д}}$ – коэффициент, учитывающий максимальную мощность нагрузки;

K_{M} – коэффициент, учитывающий номинальную мощность нагрузки;

$K_{\text{Э}}$ – коэффициент, учитывающий условия эксплуатации;

$K_{\text{П}}$ – коэффициент приёмки, учитывающий степень жёсткости требований к контролю качества и правила приёмки элементов в условиях производства.

В качестве примера в табл. 1 приведены значения поправочных коэффициентов K_i детектора денежных купюр «ДОРС-110».

Таблица 1. Значения поправочных коэффициентов K_i детектора денежных купюр «ДОРС -110», учитывающие влияние i -го факторов

Коэффициенты Элементы	K_P	K_t	K_ϕ	K_Π	K_U	K_C	K_R	K_M	K_D	K_Θ	K_Π
Диод 1N4007	0,1		1,5	0,8	0,7					3	8
Транзистор JSM13003	0,14		1,5	1,3	0,5					4	8
Конденсатор 1n5	0,03					0,96				3	5
Конденсатор 4,7-400	0,13					0,28				3	5
Конденсатор 33N	0,03					1,39				3	5
Резистор 2R2	0,62						1	0,7	2	3	5
Резистор M51	0,62						2	0,7	2	3	5
Резистор 10R	0,62						1	0,7	2	3	5
Катушка X1	0,46									3	5
Клемма X2		1,6								3	5
Кнопка X3		1,6								3	5
Предохранитель F1		1,6								3	5
Тиристор BT169D	0,09			1						1,7	8

Расчёт надёжности элементов конструкции детектора банкнот (табл. 1) был выполнен при температурах от +5 до +30 градусов, допустимых согласно техническому паспорту модели «ДОРС–110» [6]. В качестве примера в табл. 2 представлены относительные значения эксплуатационной интенсивности отказов элементов детектора при различных значениях температуры окружающей среды θ . В качестве базовых приняты значения интенсивностей отказов при температуре окружающей среды $\theta = 5^\circ\text{C}$.

Температура окружающей среды не влияет на интенсивность отказов катушек индуктивности и данные значения не приводятся в табл. 2.

По данным табл. 2 построены графики зависимостей относительные значения эксплуатационной интенсивности отказов элементов детектора при различных значениях температуры окружающей среды θ .

Таблица 2. – Относительные значения эксплуатационная интенсивность отказов при различных значениях температуры окружающей среды

Элементы	$\theta = 5^\circ\text{C}$	$\theta = 10^\circ\text{C}$	$\theta = 20^\circ\text{C}$	$\theta = 30^\circ\text{C}$
Диод	1.00	1.09	1.32	1.57
Транзистор	1.00	1.09	1.21	1.33
Резисторы	1.00	1.04	1.08	1.23
Конденсаторы	1.00	1.00	1.00	1.00
Кнопка, клеммы	1.00	1.42	2.30	3.15
Предохранитель	1.00	1.50	2.25	3.08
Тиристор	1.00	1.11	1.31	1.63

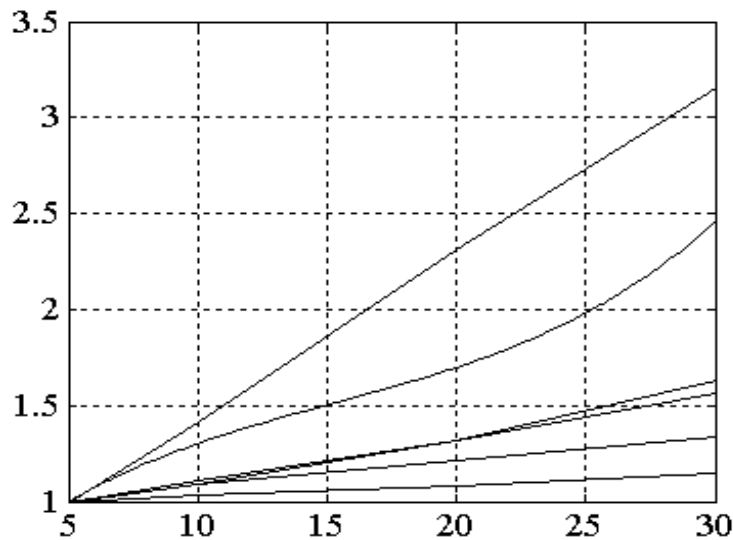


Рис. 2. Относительные значения эксплуатационная интенсивность отказов при различных значениях температуры окружающей среды

Из анализа результатов, представленных в табл. 2 и на рис. 2 следует, что наибольшее влияние температура окружающей среды оказывает на интенсивность отказов клемм, кнопок, предохранителей, в меньшей степени возрастает интенсивность отказов диода, тиристора, транзистора, резисторов. Например, при увеличении температуры окружающей среды на 25°C интенсивность отказов резистора возрастает в 1.16 раз, транзистора – в 1.33 раза, диода – в 1.5 раз, конденсатора – в 2.0 раза, а кнопки и клемм – в 2.7 раза и т.д.

По известным значениям интенсивностей отказов элементов детектора банкнот выполнена оценка вероятности безотказной работы от времени при различных значениях температуры окружающей среды θ [7, 8]:

$$P_{\Sigma}(t_2) = e^{-\lambda_1 t_2} \cdot e^{-\lambda_2 t_2} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_N t_2} = e^{-t_2 \sum_{i=1}^N \lambda_i}, \quad (2)$$

где N – количество элементов в устройстве; λ_i – параметр экспоненциального распределения для i -го элемента, численно равный интенсивности отказов этого элемента, $i = 1, \dots, N$.

Наработка на отказ определяется из выражения [7, 8]:

$$T_0 = 1/\Lambda_M, \quad (3)$$

где Λ_M – эксплуатационная интенсивность отказов всей схемы.

Вероятность безотказной работы (табл. 3) определялась при условии эксплуатации детектора денежных купюр в течение одного года.

Таблица 3. – Наработка на отказ и вероятность безотказной работы детектора банкнот при различных значениях температуры окружающей среды

$\theta = 5^{\circ}\text{C}$		$\theta = 10^{\circ}\text{C}$		$\theta = 20^{\circ}\text{C}$		$\theta = 30^{\circ}\text{C}$	
T_0/T_0^*	$P, \%$	T_0/T_0^*	$P, \%$	T_0/T_0^*	$P, \%$	T_0/T_0^*	$P, \%$
14.9/1.00	93,4	13.4/0.90	92,7	11.3/0.76	91,3	9.7/0.65	89,9

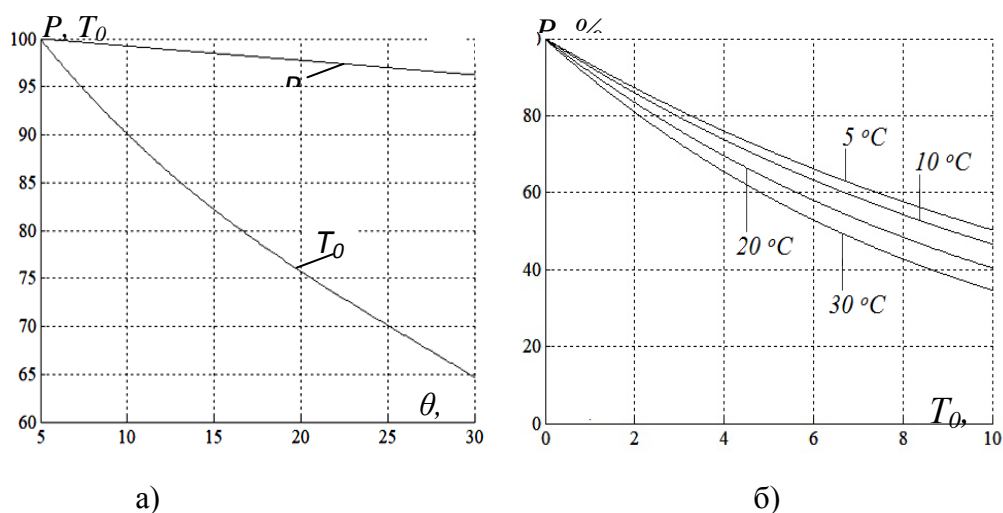


Рис. 3. Графики зависимости наработки на отказ (T_0), вероятности безотказной работы (P) от температуры θ (рис. 3а), вероятности безотказной работы от длительности безотказной работы при различных значениях θ (рис. 3б).

Из анализа результатов, представленных в табл. 3 и рис. 3 следует, что при повышении температуры условий эксплуатации, значительно уменьшается длительность безаварийной эксплуатации детектора денежных банкнот. Например, при $\theta = 10^\circ\text{C}$ срок безаварийной эксплуатации снизился на 10 %, при $\theta = 20^\circ\text{C}$ – на 24 %, а при $\theta = 30^\circ\text{C}$ – на 35% и более, при этом снижение вероятность безотказной работы в течение 1 года не превышает – 0.7%, 1.1% и 3.5% соответственно.

В работе была изучена возможность повышения безотказности детектора банкнот за счёт замены наименее надёжных его комплектующих элементами с более низкими интенсивностями отказов (табл. 4), а также была выполнена оценка целесообразности подобной замены.

Таблица 4. – Сравнение элементов по цене и интенсивности отказов

Элемент схемы	$\lambda_{\Sigma}, 10^{-6}$ 1/ч	Цена, руб.	Элемент на замену	$\lambda_{\Sigma}, 10^{-6}$ 1/ч	Цена, руб.
Резистор 2R2	1,156	1,20	Резистор (+/-5%) 0,25Вт 2,2 Ом Royal OHM	0,578	5,00
Резистор 10R	1,156	3,66	Резистор (+/-1%) 0,25Вт 10 Ом ROHS	0,578	7,16
Резистор m51	2,311	4,00	Резистор (+/-1%) 0,25Вт 510кОм VISHAY	1,156	7,84
Клемма X2	1,497	17,90	Клемма WAGO 4mm2, 773–604 красная	1,497	30,18
Кнопка X3	1,497	68,42	B100DY Кнопка (1НО) Emas	1,497	191,83
Диод 1N4007	0,577	3,21	Диод КД258Д 0,8 А DIOTEC	0,4327	7,20
Транзистор JSM13003	0,395	3,94	Транзистор КТ8137А 15 W RUSSIA	0,304	20,00
Конденсатор 1n5	0,009	2,42	Конденсатор NP0 1нФ Ether Components	0,009	4,12
Конденсатор 4,7-400	0,098	3,50	Конденсатор 3,3x400 ECAP (K50-35 мини)	0,009	8,40
Конденсатор 33n	0,013	5,32	0603 15 нФ 50V X7R ±10% SR Passives	0,012	12,00

Элемент схемы	$\lambda_{\text{э}}, 10^{-6}$ 1/ч	Цена, руб.	Элемент на замену	$\lambda_{\text{э}}, 10^{-6}$ 1/ч	Цена, руб.
Предохранитель F1	0,266	10,50	Предохранитель НПП-2 63А СССР	0,266	18,50
Тиристор BT169D	0,252	9,24	Тиристор MCR100-6 Imax 1А	0,252	18,00

Из анализа результатов, представленных в табл. 4 следует, что замена резисторов схемы на этапе проектирования более надежными аналогами позволяет снизить интенсивность отказов элементов в два раза, а срок службы детектора банкнот увеличивается на 1.2 года. Например, (табл. 4) замена резисторов *2R2* увеличит стоимость схемы на 3,8 руб., резистора *10R* – на 3,5 руб., резистора *M51* – на 3,84 руб. В этом случае увеличение стоимости детектора банкнот при подобной замене не превышает 22.3 руб., что значительно ниже стоимости устройства.

Замена конденсаторов схемы более надежными аналогами позволяет снизить интенсивность отказов на 1–9%, Замена диода *1N4007* и транзистора *JSM13003* более надежными аналогами целесообразна, так как позволяет снизить интенсивность отказов на 25% и 23% соответственно, в этом случае увеличение стоимости готового изделия не превышает 30 руб., что составляет не более 0.05% готового детектора.

В работе установлено (табл. 4), что замена соединений клемм *X2*, кнопки *X3* и предохранителя *F1*, диода *1N4007*, транзистора *JSM13003*, конденсаторов *1n5*, *4.7-400*, *33n* и тиристора *MCR 100-6* на более дорогие, аналоги позволяет повысить интенсивность отказов детектора банкнот на 2–5 %, что находится в пределах погрешности расчета.

Выводы. В работе выполнен анализ влияние температуры окружающей среды на показатели надежности детектора банкнот. В результате установлено, что рост температуры окружающей среды до 30 °С, допустимых согласно паспорту детектора приводит к сокращению срока его безаварийной эксплуатации на 35 % и более. Для повышения срока безаварийной эксплуатации в работе предложено выполнять замену отдельных комплектующих детектора банкнот на более надежные аналоги.

Результаты исследования, выполненные в статье, могут быть использованы, как на этапе проектирования детектора денежных купюр, так и в условиях его эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бережной В. П. Выявление причин отказов РЭА / В. П. Бережной, Л. Г. Дубицкий. – Москва : Радио и связь, 1983. – 232 с.
2. Филиппов Б. И. Определение характеристик надежности радиоэлектронных систем / Б. И. Филиппов, Ю. В. Замятина // Сборник научных трудов НГТУ – 2016. – № 3 (85). – С. 83-97.
3. Яшин А. А. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности ЭВА : учеб. пособие / А. А. Яшин. – Москва : Радио и связь, 1983. – 312 с.
4. Надежность радиоэлектронных средств : программа, метод. указания, контрольные работы для студентов заоч. обучения / сост. С. С. Князева. - Казань : Изд-во КГТУ, 1999. - 32 с.
5. Ионов В. М. Обработка наличности: банковская техника и технологии : практ. пособие / В. М. Ионов. – Москва : БДЦ-пресс, 2001. – 268 с.
6. DORS 100/110. Counterfeit Detector for Bank and Securities. Детектор банкнот и ценных бумаг [Электронный ресурс] : Инструкция по эксплуатации DORS 100 и 110. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа : <http://kkt-s.ru/docs/dors100.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Описание основано на версии, датир. : апр. 18, 2019.

7. Боровиков С. М. Расчёт показателей надёжности радиоэлектронных средств : учеб.-метод. пособие / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян ; под ред. С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2010. – 68 с.
8. Боровиков С. М. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности : учеб.-метод. пособие / С. М. Боровиков, Т. В. Малышева ; под ред. С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2004. – 55 с.
9. Козлов Б. А. Справочник по расчету надёжности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б. А. Козлов, И. А. Ушаков. – Москва : Сов. радио, 1975. – 472 с.
10. Надёжность технических систем : справочник / Ю. К. Беляев [и др.] ; под ред. И. А. Ушакова. – Москва : Радио и связь, 1985. – 608 с.
11. **ГОСТ 27.301–95.** Надёжность в технике. Расчёт надёжности. Основные положения. – Взамен ГОСТ 27.410-87 ; введ. 1997-01-01. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1990. – 19 с.
12. **ГОСТ 27.003–90.** Состав и общие правила задания требований по надёжности. – Введ. 1992–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1991. – 27 с.
13. **ГОСТ 27.301–83.** Прогнозирование надёжности изделий при проектировании. Общие требования. – Введ. 1984–07–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1983. – 42 с.
14. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В. С. Королюк [и др.]. – Москва : Наука, 1985. – 640 с.
15. Князева С. С. Основы расчета надёжности РЭА : метод. пособие по курсовому и дипломному проектированию / С. С. Князева. – Казань : КАИ им. А.Н. Туполева, 1979. – 32 с.
16. Князева С. С. Прогнозирование надёжности гибридных интегральных схем : учеб. пособие / С. С. Князева, М. Ф. Тюхтин ; Казан. авиац. ин-т им. А. Н. Туполева. – Казань : КАИ, 1990. – 28,[2] с.

Поступила в редакцию 04.03.2019 г.

EVALUATION OF THE EFFECT OF AMBIENT TEMPERATURE ON THE RELIABILITY OF BANKNOTE DETECTOR

O. Shelekhova, V. Kushchenko, V. Popadin

The values of correction factors were calculated and the failure rate of all elements of the detector of banknotes "DORS-110" was calculated. The intensity of all elements was analyzed, and alternatives to replace some elements to improve reliability were considered. Conclusions are drawn about the work done.

Keywords: reliability, failure rate, model of calculation of operational failure rate, time between failures, the probability of failure.

Шелехова Ольга Георгиевна

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры радиоп физики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.

E-mail: jennaistorik@mail.ru

Кущенко Вадим Романович

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

E-mail: vad00@mail.ua

Shelekhova Olga

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

Kushchenko Vadim

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

Попадин Дмитрий Владимирович

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

E-mail: dimon.popadin.21@yandex.ru

Popadin Dmitrii

Student at Department of Computer 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

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА
СПЕКТРАЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ–РАЗУПЛОТНЕНИЯ ПОТОКОВ ДАННЫХ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

© 2019 И.А. Третьяков, А.В. Шалаев, В.В. Данилов

В настоящей работе представлена методика расчета количества каналов связи, коммутируемых коллинеарной акустооптической ячейкой оптических каналов при спектральном их уплотнении, определена предельная скорость произвольного переключения каналов. Представлена методика измерения аппаратной функции акустооптического элемента спектрального разуплотнения для измерения аппаратной функции коллинеарной акустооптической ячейки.

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

Введение. 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 [1,2]. 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 [3-5].

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.

Постановка задачи. Спектральное уплотнение каналов в оптической связи ставит задачу их последующего разуплотнения на стороне потребителя информации. Данная задача может быть решена благодаря применению акустооптического элемента спектрального уплотнения–разуплотнения потоков данных, модель которого предложена в работе [6]. Учитывая вышесказанное, в данной статье рассмотрена методика исследования такого элемента.

Методика расчета количества каналов связи, коммутируемых коллинеарной акустооптической ячейкой. Для оценки числа каналов, разуплотняемых

коллинеарной акустооптической ячейкой, рассмотрим следующую модель. Пусть в интервале рабочих длин волн от λ_{\min} до λ_{\max} равномерно размещены K каналов, спектральная ширина каждого составляет $\Delta\lambda$. Предположим, что спектральная плотность интенсивности каналов постоянна и равна P . Для характеристики используемой коллинеарной акустооптической ячейкой примем следующие обозначения: $A(\lambda)$ – аппаратная функция данной ячейки; $\delta\lambda$ – ширина полосы пропускания по уровню 0,5; m – оптический контраст ячейки, в предположении 100% - ой акустооптической эффективности пропускания. Допустимое значение перекрестных искажений, зададим β_{\max} – максимальное отношение энергии, поступающей потребителю от всех боковых лепестков к энергии, регистрируемой в данном канале. Рассмотрим случай когда $\Delta\lambda \geq \delta\lambda$. Это условие реализуется на практике, когда в качестве источника когерентного излучения используется полупроводниковый инжекционный лазер, ширина полосы излучения которого составляет несколько нанометров, тогда как ширина полосы пропускания коллинеарной акустооптической ячейки составляет несколько ангстрем [7-9]. При настройке коллинеарной акустооптической ячейки на один из каналов, интенсивность излучения, пропущенного ячейкой, равна I . Интенсивность излучения одного из боковых каналов, отстоящего от измеряемого канала, при прохождении через ячейку, определяется контрастом последней и равна [9]:

$$I' = P\Delta\lambda m. \quad (1)$$

Вблизи измеряемого канала, интенсивность излучения боковых каналов, прошедших через ячейку, определяется аппаратной функцией $A(\lambda)$. Наибольший вклад боковые каналы вносят при совмещении их с боковыми максимумами аппаратной функции. Для оценки этого вклада необходимо учесть спад максимумов функции $A(\lambda)$, вплоть до значения m , после которого расчет ведется согласно (1). Из вида $A(\lambda)$, следует, что по мере удаления от центра полосы пропускания коллинеарной акустооптической ячейки, боковые максимумы аппаратной функции спадают как $1/(1,7N^2)$, где N – расстояние от центра полосы, нормированное к величине $\delta\lambda$. Откуда следует, что вклад боковых каналов, определяемых функцией $A(\lambda)$, необходимо учитывать в пределах спектрального интервала, отстоящего от центра пропускания на $\pm N_{\max}\delta\lambda$, где N_{\max} определяется из соотношения $\frac{I_d/I_i}{7,5N_{\max}^2} = m$, так что

вышеупомянутый интервал составляет $\frac{2\delta\lambda\sqrt{I_d/I_i}}{\sqrt{7,5m}}$. Поскольку расстояние между

каналами составляет $\frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{K}$, то число каналов внутри рассматриваемого

интервала равно $\frac{2\delta\lambda\sqrt{I_d/I_i}K}{\sqrt{7,5m}(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})} = 2M$. Очевидно, что вклад каждого из этих

каналов в величину перекрестных искажений не превышает величины:

$$I'' = P\Delta\lambda \frac{K^2(\delta\lambda)^2(I_d/I_i)}{7,5i^2(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})^2},$$

где i - порядковый номер бокового канала при начале отсчета после измеряемого канала.

Суммируя интенсивность излучения, соответствующую всем боковым каналам, получим полную величину интенсивности перекрестных помех:

$$I_n = 2 \sum_{i=1}^{i=M} I'' + (K - 2M - 1)I' = 2 \sum_{i=1}^{i=M} P\Delta\lambda \frac{K^2 (\delta\lambda)^2 (I_d / I_i)}{7,5i^2 (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})^2} + (K - 2M - 1)P\Delta\lambda m. \quad (2)$$

Учитывая допустимое значение перекрестных искажений $(I_n / I) \leq \beta_{\max}$, выражение (2) перепишем в виде:

$$2 \sum_{i=1}^{i=M} \frac{K^2 \delta\lambda \Delta\lambda}{7,5i^2 (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})^2} + (K - 2M - 1) \frac{\Delta\lambda m}{\delta\lambda (I_d / I_i)} \leq \beta_{\max}. \quad (3)$$

Сделав допущение вида $M \ll K$ и $\sum_{i=1}^{i=M} i^2 = 1,5$, из уравнения (3) следует:

$$\frac{\delta\lambda (I_d / I_i)}{2,5 (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})^2} K^2 + \frac{m}{\lambda} K - \frac{(I_d / I_i) \beta_{\max}}{\Delta\lambda} = 0. \quad (4)$$

Решение (4) дает допустимое значение числа каналов, разуплотняемых коллинеарной акустооптической ячейкой, при условии принятых ограничений. Например, при $\beta_{\max} = 4 \cdot 10^{-2}$ (14 дБ); $\lambda_{\max} - \lambda_{\min} = 4000 \text{ \AA}$; $\Delta\lambda = 20 \text{ \AA}$; $\delta\lambda = 2 \text{ \AA}$; $m = 1,5 \times 10^{-5}$; $I_d / I_i = 0,6$ следует что число каналов уплотняемых (разуплотняемых) ячейкой равно $K = 110$.

Методика измерения аппаратной функции акустооптического элемента спектрального разуплотнения. Предел спектрального уплотнения каналов, как было показано выше, определяется максимальным уровнем перекрестных помех. Применение коллинеарной акустооптической ячейки в качестве разуплотнителя накладывает специфические требования на спектральное уплотнение, поскольку перекрестные помехи оказываются связанными, во - первых оптическим контрастом ячейки (оптический контраст характеризует отношение сигналов на выходе элемента с полезной и паразитной поляризацией), во-вторых, наличием боковых лепестков аппаратной функции акустооптической ячейки. Анализ работы спектрального разуплотнителя на основе коллинеарной акустооптической ячейки показал, что количество разуплотняемых каналов определяется, с одной стороны диапазоном рабочих длин волн $(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})$, спектральной шириной разуплотняемых каналов $\Delta\lambda$ и допустимым уровнем перекрестных помех β_{\max} , а с другой стороны, такими параметрами как акустооптическая эффективность I_d / I_i , оптический контраст m , ширина полосы пропускания $\delta\lambda$. С помощью установки, структура которой показана на рис. 1, производилась оценка соответствия реальной аппаратной функции КАОЯ (рис. 2а) ее теоретическому представлению (рис. 2б).

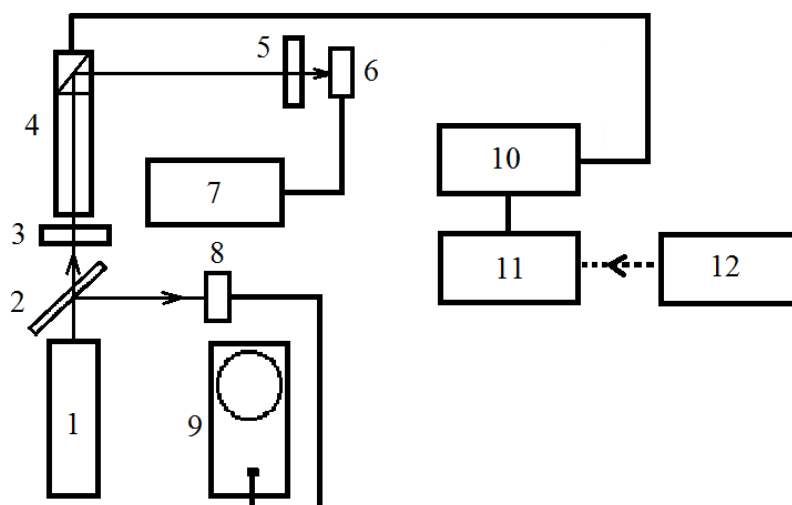


Рис. 1. Структурная схема установки для контроля аппаратной функции акустооптической ячейки

На структурной схеме (рис. 1) обозначены: 1 – газовый лазер; 2 – полупрозрачное зеркало; 3,5 – поляризатор и анализатор; 6,8 – фотоприемники; 7 – универсальный вольтметр; 10 – широкополосный усилитель мощности управляющего радиосигнала; 11 – генератор Г4-107; 12 – импульсный генератор Г5-54. На КАОЯ подавался сигнал от генератора 11, через усилитель мощности 10. Уровень пропускания коллинеарной акустооптической ячейки, соответствующий разным частотам управляющего радиосигнала, регистрировался одновременно с регистрацией уровня входного излучения лазера (элементы 8,9), что учитывалось при последующем построении $A(\lambda)$. Как видно из графика (рис. 2а), величина боковых максимумов уменьшается по мере удаления от центра полосы пропускания, однако степень спада величины боковых максимумов не соответствует зависимости $1/(7,5N^2)$, а существенно слабее.

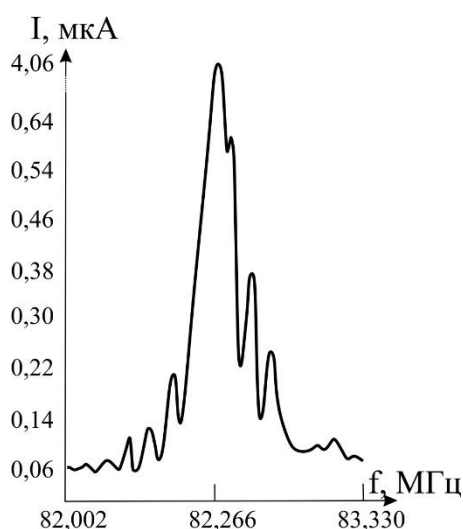


Рис. 2а. Реальная аппаратная функция КАОЯ

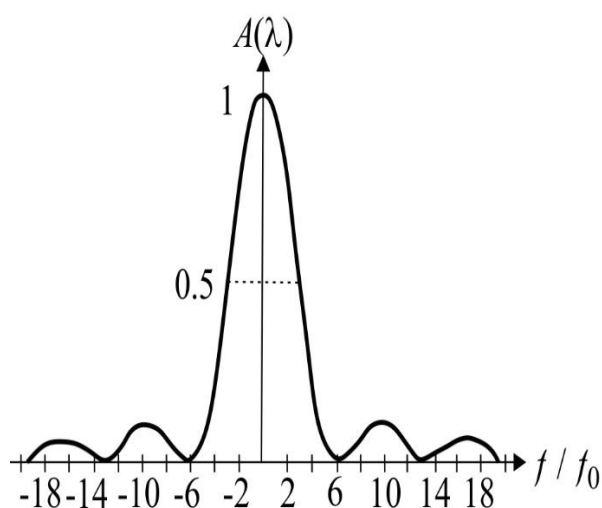


Рис. 2б. Идеализированная аппаратная функция КАОЯ [6]

Отсюда следует, что при инженерных расчетах полного числа разуплотняемых каналов или уровня перекрестных помех необходимо исходить из учета реальной аппаратной функции КАОЯ.

Экспериментальное исследование акустооптического элемента спектрального разуплотнения в макете оптического вычислительного средства. Структура установки, моделирующей оптическую линию связи показана на рис. 3.

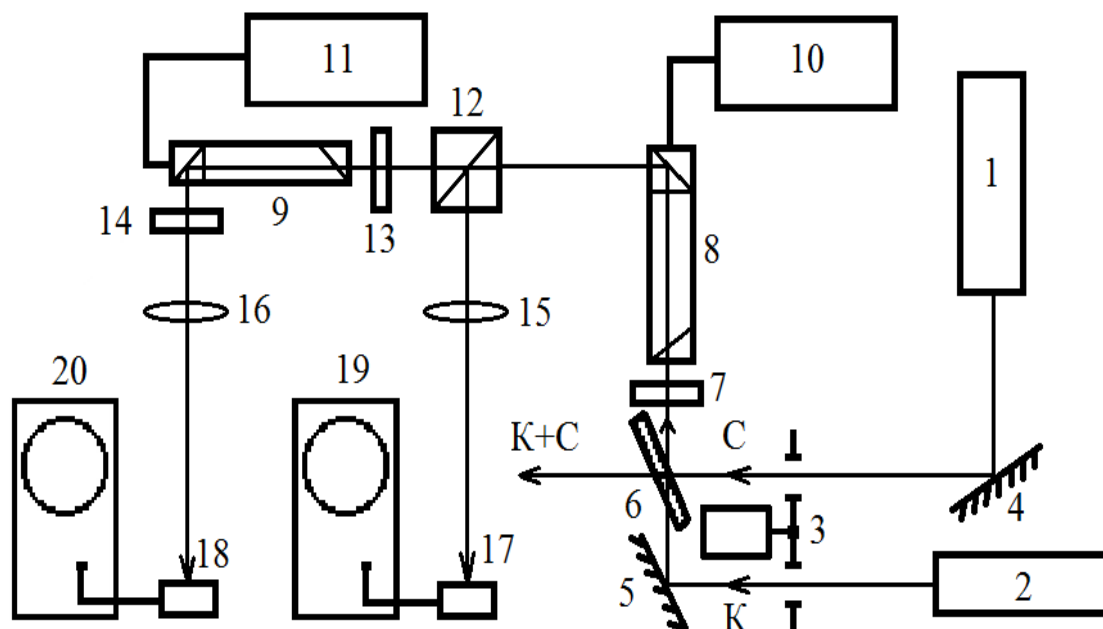


Рис. 3. Блок - схема макета оптической линии связи

На блок-схеме (рис. 3) обозначены: 1 - лазер ЛГ-70; 2 - лазер ЛГ-44; 3 - механический модулятор-обтюратор; 4,5 – металлические зеркала; 6 – диэлектрическое полупрозрачное зеркало; 7,13,14 – поляризаторы пленочные; 8,9 – КАОЯ; 10,11 – устройства управления АОЯ; 12 - поляризатор типа призмы Глана; 15,16 – собирающие линзы; 17,18 – фотодиоды ФД-9Э111, 19 - осциллограф С1-68; 20 – осциллограф С1-72. Тракт источника оптических сигналов сформирован с помощью двух лазеров, с длинами волн 0,63 и 0,44 мкм, пучки которых объединены с помощью зеркал. Механический обтюратор предназначен для прерывания красного луча с частотой 1 кГц, синего – с частотой 0,5 кГц. С помощью акустооптических фильтров произвольно выделялся любой из каналов. Для оценки уровня перекрестных помех, измерялся контраст обоих акустооптических фильтров, он составлял $4,5 \cdot 10^{-4}$ и $3 \cdot 10^{-4}$. При этом получены следующие значения максимального и минимального сигналов, измеренные в первой КАОЯ фильтре для красного и синего лучей соответственно при установке поляризаторов параллельно и перпендикулярно друг другу 37,8 мВ и 17 мкВ, 50 мВ и 15 мкВ. Выделение первым фильтром красного либо синего лучей осуществлялось подачей на него управляющего радиосигнала частотой 82 либо 122 МГц. Значения зарегистрированных сигналов на частотах модуляции 0,5 и 1 кГц составили соответственно 3 и 2 мВ, что соответствует акустооптической эффективности 8% и 4%. Уровни перекрестных помех составляли $5 \cdot 10^{-3}$ и $8,5 \cdot 10^{-3}$ для красного и синего лучей,

или 23дБ и 21 дБ соответственно. Очевидно, что увеличение акустооптической эффективности позволит лучше подавлять перекрестные помехи.

Выводы. В данной работе предложена структура аппаратных средств моделирующих оптическую линию связи оптической линии связи с спектральным уплотнением каналов, на макете которой проведены исследования возможностей коллинеарной акустооптической ячейки по спектральному разуплотнению каналов связи. Представлена методика расчета количества каналов связи, коммутируемых коллинеарной акустооптической ячейкой оптических каналов при спектральном их уплотнении, а также определена предельная скорость произвольного переключения каналов КАОЯ, при спектральном разуплотнении (27 кбит/с). Представлена методика измерения аппаратной функции акустооптического элемента спектрального разуплотнения для измерения аппаратной функции коллинеарной акустооптической ячейки и определен ее реальный вид для КАОЯ.

Показано, что величина боковых максимумов коллинеарной акустооптической ячейки уменьшается по мере удаления от центра полосы пропускания, не в соответствии теоретической кривой, а существенно слабее, при проектировании полного числа разуплотняемых каналов или уровня перекрестных помех элемента, необходимо исходить из учета реальной аппаратной функции КАОЯ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шереметьев А. Г. Когерентная оптическая связь / А. Г. Шереметьев. – Москва : Радио и связь, 1991. – 190, [2] с.
2. 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.
3. Третьяков И. А. Алгоритм расчета акустооптического устройства по виду электрооптической кривой / И. А. Третьяков, Т. В. Белик // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 2. – С. 9-19.
4. 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.
5. 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.
6. Шалаев А. В. Модель акустооптического элемента спектрального уплотнения-разуплотнения потоков данных автоматизированных систем / А. В. Шалаев, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 49-56.
7. 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.
8. Балакший В. И. Физические основы акустооптики / В. И. Балакший, В. Н. Парыгин, Л. Е. Чирков. – Москва : Радио и связь, 1985. – 280 с.
9. 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 15.01.2019 г.

**RESEARCH METHODOLOGY OF ACOUSTIC ELEMENT OF SPECTRAL
COMPOSITION – DECOMPOSITION OF DATA OF AUTOMATED SYSTEMS**

I. Tretiakov, A. Shalaev, V. Danilov

This paper presents a method for calculating the number of communication channels switched by a collinear acousto-optic cell of optical channels during their spectral compaction, and the limiting speed of an arbitrary channel switching is determined. A technique for measuring the instrumental function of an acousto-optic element of spectral decomposition for measuring the instrumental function of a collinear acousto-optic cell is presented.

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

Третьяков Игорь Александрович

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

Tretiakov Igor

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

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.

УДК 681.518.22

УЯЗВИМОСТЬ КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ ХЕШ-ФУНКЦИИ MD5 К АТАКЕ ПОИСКА КОЛЛИЗИИ

© 2019 М.В. Бабичева, И.С.Верескун

Проанализированы методы нахождения коллизий хеш-функций MD5. Написана программа для генерации неограниченного количества пар бинарных блоков, имеющих одинаковый хеш-дайджест. Рассмотрены примеры атак поиска коллизий и их последствия. Выяснены причины, по которым разработчики пользуются уязвимыми хеш-функциями и предложены способы защиты от такого рода атак.

Ключевые слова: коллизии хеш-функций, MD5, алгоритм Властимила Клина, хеш-дайджест.

Постановка задачи. Несмотря на то, что коллизии хеш-функции MD5 были найдены сравнительно давно (в 2006 году), среди разработчиков бытует мнение, что поиск коллизий — это сложная и долгая процедура, требующая значительных вычислительных ресурсов, которая доступна только специалистам высокого уровня [1,2]. Кроме того, угрозы, которые влечет атака поиска коллизий не считают фатальными, поскольку до сих пор невозможно найти коллизию к уже существующему дайджесту [3]. В ходе данной работы показано, что неограниченное количество одноблочных коллизий возможно сгенерировать на бытовом компьютере за разумное время. Рассмотрены сценарии атак, использующих данные уязвимости. Проанализированы причины, по которым разработчики пользуются уязвимыми хеш-функциями.

Генерация коллизий. Известны несколько алгоритмов поиска коллизий MD5: Властимила Клина, Марка Стивенсона, Александра Кузнецова. Для генерации коллизий был выбран алгоритм Властимила Клина, как самый медленный [4]. Написана программа на языке C, которая генерировала пары битовых блоков, имеющих одинаковый хеш-дайджест. Одна из таких пар представлена на рисунке 1. Выделены различные байты в блоках, внизу — их одинаковый хеш-дайджест.

Сообщение 1
 0xFD, 0x25, 0x61, 0xE4, 0xD1, 0x82, 0xEF, 0xC0, 0xB2, 0x02, 0x47, 0x47, 0xDD, 0xC1, 0x5E, 0x7B,
 0x9C, 0xD7, 0xB2, 0x35, 0xB8, 0xAC, 0x33, 0x91, 0x5F, 0x05, 0xA9, 0x35, 0x3C, 0x3C, 0x11, 0xE6,
 0x55, 0xAD, 0x34, 0x06, 0x02, 0xBE, 0x53, 0x64, 0x5B, 0xB5, 0xA4, 0x7C, 0x52, 0x67, 0x6A, 0x14,
 0xF4, 0xEC, 0x31, 0xB9, 0xB1, 0x8D, 0x49, 0x59, 0x77, 0xE7, 0x2A, 0x83, 0x9C, 0xFB, 0x59, 0x59,
 0x35, 0xE3, 0xBC, 0xD3, 0x00, 0x3E, 0x95, 0x37, 0x53, 0xFE, 0xC8, 0xDA, 0x9D, 0x09, 0x6F, 0xB1,
 0x3C, 0x79, 0xE2, 0xC3, 0xFC, 0x47, 0x46, 0x0B, 0xEA, 0xC8, 0xA6, 0xD6, 0xCA, 0xBB, 0xD1, 0xED,
 0x2D, 0x38, 0xBF, 0xD6, 0xDD, 0x93, 0x6B, 0xC5, 0x82, 0x2D, 0x59, 0x2A, 0x9A, 0x74, 0x92, 0xFD,
 0xEA, 0x88, 0x5E, 0xFD, 0x96, 0x9C, 0x73, 0x2C, 0x60, 0xBE, 0xAA, 0x4A, 0x22, 0x81, 0xF1, 0x88.

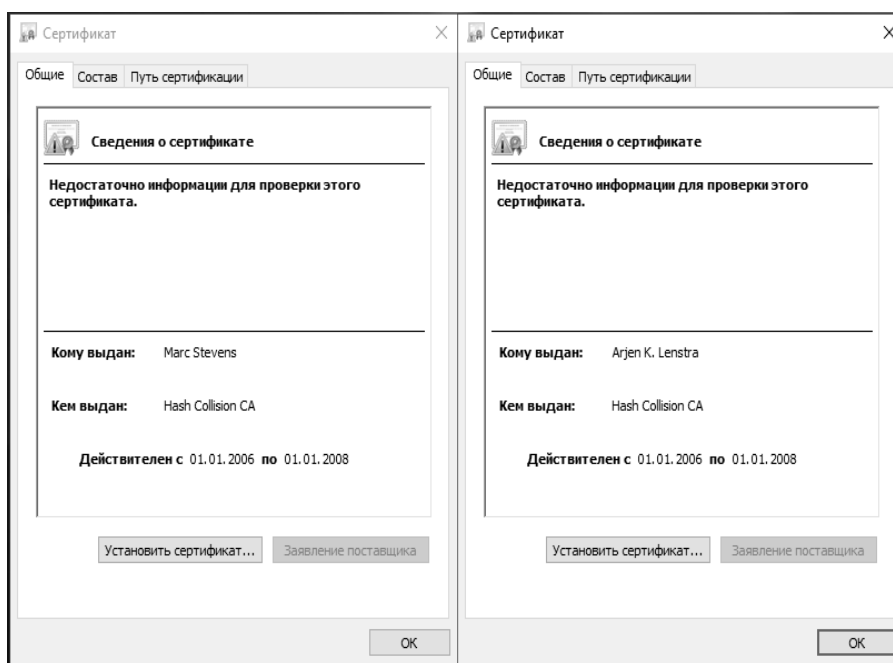
Сообщение 2
 0xFD, 0x25, 0x61, 0xE4, 0xD1, 0x82, 0xEF, 0xC0, 0xB2, 0x02, 0x47, 0x47, 0xDD, 0xC1, 0x5E, 0x7B,
 0x9C, 0xD7, 0xB2, 0xB5, 0xB8, 0xAC, 0x33, 0x91, 0x5F, 0x05, 0xA9, 0x35, 0x3C, 0x3C, 0x11, 0xE6,
 0x55, 0xAD, 0x34, 0x06, 0x02, 0xBE, 0x53, 0x64, 0x5B, 0xB5, 0xA4, 0x7C, 0x52, 0xE7, 0x6A, 0x14,
 0xF4, 0xEC, 0x31, 0xB9, 0xB1, 0x8D, 0x49, 0x59, 0x77, 0xE7, 0x2A, 0x03, 0x9C, 0xFB, 0x59, 0x59,
 0x35, 0xE3, 0xBC, 0xD3, 0x00, 0x3E, 0x95, 0x37, 0x53, 0xFE, 0xC8, 0xDA, 0x9D, 0x09, 0x6F, 0xB1,
 0x3C, 0x79, 0xE2, 0x43, 0xFC, 0x47, 0x46, 0x0B, 0xEA, 0xC8, 0xA6, 0xD6, 0xCA, 0xBB, 0xD1, 0xED,
 0x2D, 0x38, 0xBF, 0xD6, 0xDD, 0x93, 0x6B, 0xC5, 0x82, 0x2D, 0x59, 0x2A, 0x9A, 0xF4, 0x91, 0xFD,
 0xEA, 0x88, 0x5E, 0xFD, 0x96, 0x9C, 0x73, 0x2C, 0x60, 0xBE, 0xAA, 0xCA, 0x22, 0x81, 0xF1, 0x88.

Значение MD5: 5257296F23480CF8D87C434BF902DE3B

Рис. 1. Пример найденной коллизии

Время, затраченное на поиск одной коллизии, не имело прямой зависимости от количества уже найденных коллизий, и в среднем, на ноутбуке Asus k53t (intel core i5, 8 Гб оперативной памяти) составляло 13,7с. Было сгенерировано 1000 бинарных блоков, и проверены их хеш-суммы. Однако сами по себе найденные коллизии не несут никакой угрозы, они только демонстрируют уязвимость хеш-функции MD5. Рассмотрим возможность эксплуатации злоумышленниками данной уязвимости.

Примеры атак поиска коллизий. Благодаря возможности нахождения коллизии MD5 выявлена уязвимость в инфраструктуре открытых ключей Интернета (PKI), используемой для выпуска цифровых сертификатов SSL для защищенных веб-сайтов. Был выполнен практический сценарий атаки и успешно созданы 2 сертификата на разные имена (рис.2), имеющие одинаковую хеш-сумму. центра сертификации, которому доверяют все распространенные веб-браузеры[5]. Такие поддельные сертификаты позволяют злоумышленнику подменять валидные сертификаты, выдавая себя другой веб-сайт, включая банковские сайты и сайты электронной коммерции, защищенные по протоколу HTTPS.



Значение MD5 F44E84E0EE0F434B0CD2CA603EDF73CD

Рис. 2. Пара SSL сертификатов, имеющая одинаковый MD5

30 ноября 2007 года на одном из сайтов были опубликованы предсказания результатов выборов президента США. Результаты хранили в секрете, а выложили только MD5 хеш документа содержащего имя победителя. В последствии была раскрыта суть мистификации. С помощью кластера из 8-ми SonyPlaystation 3 были сгенерированы 12 документов с одинаковым хеш-дайджестом MD5 с именами разных «победителей», для имитации предсказания результатов президентских выборов в США 2008 года [6].

Еще одним наглядным примером реализации коллизий является пара файлов jpg, представленных на рисунке 3. Значения MD5 этих файлов равны, хотя содержимое различается кардинальным образом. Такого рода атаки можно использовать, например, для подмены сканов документов.



Значение MD5: C6A1029A9511AE2182D7A65BF506541A

Рис. 3. Два файла .jpg, имеющие одинаковый MD5

Использование хеш-функций, подверженных коллизиям. Хэш-функции являются необходимым элементом многих криптографических схем: проверка целостности данных, электронно-цифровая подпись, необратимое шифрование паролей, сертификаты SSL. Наличие эффективных методов поиска коллизий позволяет использовать их для подделки электронной подписи. При этом, конечно нельзя сформировать поддельный документ, имеющий тот же хеш-дайджест, что и оригинальный, но можно сгенерировать 2 документа, с разными данными, имеющих одинаковый MD5 и подменить один другим после проверки электронно-цифровой подписи.

Расшифровка паролей, если их нет в словарях, сводится к прямому перебору и среднее количество необходимых попыток для MD5, составляет 2^{128} . Из-за возможности существования коллизий, перебор может завершиться до нахождения исходного ключа подбором эквивалентного значения. Существуют примеры коллизий платежных поручений, отличающихся лишь суммой платежа, а также коллизий SSL сертификатов, имеющих разные открытые ключи, однако, одинаковые хеш-суммы. Это делает возможным создание фишинговых сайтов с обменом по протоколу HTTPS.

Простым способом устранения данной уязвимости является использование дополнительного алгоритма хеширования с объединением результатов для формирования хэш-кода, или применение хеш-функций с дайджестами большей длины (например SHA-256 или SHA-512). Данные алгоритмы на сегодняшний день имеют достаточно высокую стойкость к коллизиям, однако усложнение алгоритма часто приводит к увеличению вычислительной сложности и затрат на его реализацию. Другие причины, по которым разработчики пользуются уязвимыми хеш-функциями представлены на рисунке 4. Было опрошено 50 программистов, пишущих код на 6-ти языках программирования, из них 20 используют MD5. Как видно из таблицы большинство пользуется MD5 по привычке, к тому же не во всех языках есть криптостойкие встроенные хеш-функции.

№	Причина, по которой разработчик пользуется MD5	Кол-во (%)
1	Есть встроенная функция MD5() в языке программирования.	20
2	Не знаю ничего о коллизиях MD5.	5
3	Знаю о коллизиях, но считаю, что для моих задач их наличие не существенно.	25
4	Использую MD5 по привычке.	35
5	Использую MD5, так как важно быстродействие.	5
6	Пользуюсь готовыми решениями из Интернета, а там есть MD5.	10

Рис. 4. Результаты опроса разработчиков

Выводы. В работе доказано, что злоумышленник имеет возможность создать два разных документа, у которых будет одинаковое хеш-значение MD5 на бытовом компьютере за разумное время. И хотя, нельзя создать «двойника» к уже существующему чужому документу, тексту, файлу, наличие эффективных методов поиска коллизии подрывает стойкость протоколов электронной подписи, снижает время подбора ключей шифрования либо паролей, позволяет подменивать сертификаты SSL. Для защиты от этой уязвимости разработчикам не рекомендуется использовать хеш-функцию MD5, а вместо нее пользоваться ГОСТ р 34.111-2012, SHA-224, SHA-256, SHA-384, SHA-512 либо сразу несколькими хеш функциями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuznetsov A. A. An algorithm for MD5 single-block collision attack using high-performance computing cluster [Электронный ресурс] / A. A. Kuznetsov // Cryptology ePrint Archive. – 2014/871. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <https://eprint.iacr.org/2014/871.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения: 24.01.2019.
2. Dobbertin H. The Status of MD5 After a Recent Attack [Электронный ресурс] / H. Dobbertin // CryptoBytes. – 1996. – Vol. 2, № 2, Summer. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <ftp://ftp.arnes.si/packages/crypto-tools/rsa.../crypto2n2.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Дата обращения: 24.01.2019.
3. Kuznetsov A. A. On the cryptographic security of the "BotikKey" authentication protocol against attacks on MD5 hash function / A. A. Kuznetsov // Programmnye Sistemy: Teoriya i Prilozheniya. – 2015. – 6:1 – P. 135-145.
4. Klima V. Tunnels in hash functions MD5 collisions within a minute/ V. Klima // Cryptology ePrint Archive. – 2006/105. – P. 323-327.
5. Stevens M. Chosen-prefix Collisions for MD5 and Colliding X.509 Certificates for Different Identities / M. Stevens, A. K. Lenstra, B. de Weger // EUROCRYPT: Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques. Advances in Cryptology – EUROCRYPT 2007 : 26th Annual Int. Conf. on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques, Barcelona, Spain, May 20-24, 2007. – Berlin, 2007. – P. 1-22.
6. Stevens M. Chosen-prefix Collisions for MD5 and Applications / M. Stevens, A. K. Lenstra, B. de Weger // International Journal of Applied Cryptography. – 2008. – Vol. 5, № 2. – P. 322-359.

Поступила в редакцию 11.03.2019 г.

MD5 CRYPTOGRAPHIC HASH FUNCTION VULNERABILITY TO THE COLLISION SEARCH ATTACK

M. Babicheva M., I. Vereskun

The methods for MD5 hash collision collisions finding are analyzed. A program to generate an unlimited number of pairs of binary blocks that have the same hash digest is written. Examples of collision search attacks and their consequences are considered. The reasons for developers use vulnerable hash functions and ways to protect against such attacks are presented.

Keywords: hash function collisions, MD5, Vlastimil Klima algorithm, hash digest.

Бабичева Маргарита Вадимовна

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

Babicheva Margarita

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

Верескун Иван Сергеевич

студент кафедры радиофизики и
инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО
«Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: Feyk1_1@mail.ru

Vereskun Ivan

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

УДК 004.67

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. СПЕКТРАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИГНАЛОВ

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

В работе рассмотрены основы физического описания процессов преобразования и переноса информации многомерными сигналами (изображениями), зависящих, в общем случае, от четырех переменных (трех пространственных координат и времени). Показано, что эта особенность спектрального диапазона привела к возможности значительного увеличения скорости и объема обрабатываемой информации.

Ключевые слова: оптические информационные технологии, оптическая система обработки, спектральная плотность, функция отсчета, преобразование Гильберта.

Введение. Процесс передачи, приема и хранения информации (обработки) в оптическом диапазоне непрерывно сопровождается преобразованием пространственно-распределенных колебаний электромагнитного поля. Взаимодействуя с соответствующей элементной базой оптической системы определенного функционального назначения, основу которой составляют линзы, зеркала, дифракционные решетки и т.д., существует реальность выполнения сложных математических операций, например, преобразований Фурье и Френеля, преобразования свертки и автокорреляции и т. п. Время обработки информации таких оптических систем определяется скоростью распространения электромагнитных волн. Поэтому оптические системы обработки, по сути, являются вычислительными машинами реального времени, в которых циркулируют и одномерные (сигналы) и многомерные (изображения) представления информации [1-6]. В исследованиях, проведенных над оптическими системами обработки в [1-6] показана потребность знания физических основ их функционирования, в частности, выяснения математических описаний сигналов, часто используемых для показа процессов оптической обработки. Это сигналы с ограниченным спектром и комплексные, их спектральная плотность. Именно этому посвящена данная статья.

Сигналы с ограниченным спектром. Почти все сигналы имеют ограниченный спектр. Если ω_c - максимальная частота спектра, то спектральная плотность колебаний с ограниченной полосой частот равна некоторой постоянной величине в интервале $-\omega_c$ до ω_c и нулю вне этого интервала. Используя обратное преобразование Фурье, находим функцию, описывающую этот сигнал

$f_0(t) = (0,5/\pi) \int_{-\omega_c}^{\omega_c} a \exp(i\omega t) dt = (a/\pi) \omega_c \frac{\sin \omega_c t}{\omega_c t}$, где a - постоянная. Упростим

выражение, сделав предположение, что $a = \pi/\omega_c$. Тогда $f_0(t) = \frac{\sin \omega_c t}{\omega_c t}$;

$G_0(\omega) = \begin{cases} \frac{\pi}{\omega_c}, & |\omega| \leq \omega_c \\ 0, & |\omega| > \omega_c \end{cases}$. Функцию $f_0(t)$ называют функцией отсчета. Максимальное ее

значение равно единице. В точках $t = k\pi / \omega_c$, $k = \pm 1, \pm 2, \dots$ она равна нулю. Смещение функции $f_0(t)$ вдоль оси времени не приводит к изменению полосы частот, занимаемых этой функцией. Если смещение вдоль оси времени равно целому числу интервалов π / ω_c получаются функции ортогональные между собой:

$f_k(t) = f_0(t - k\pi / \omega_c) = \sin(\omega_c t - k\pi) / \omega_c t - k\pi$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Любую функцию со спектром, заключенным в полосе частот $0 - \omega_c$ можно представить рядом по функциям

отсчетов (в ряд Котельникова): $f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k f_k(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \sin(\omega_c t - k\pi) / \omega_c t - k\pi$.

В следующей последовательности найдем коэффициенты разложения a_k .

Допустим $t = n\pi / \omega_c$, тогда получим: $f\left(\frac{n\pi}{\omega_c}\right) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k \sin(n\pi - k\pi) / (n\pi - k\pi)$. Так как

при $k \neq n$ это выражение равно нулю, а при $k = n$ - единице, то $f\left(\frac{n\pi}{\omega_c}\right) = a_n$ и ряд

Котельникова принимает вид: $f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k\pi / \omega_c) \sin(\omega_c t - k\pi) / (\omega_c t - k\pi)$. Выясним

смысл коэффициентов разложения [12]. Обозначив период наивысшей частоты спектра T_c ($\omega_c = 2\pi / T_c$), получим $a_n = f(nT_c / 2)$, т.е. a_n - это значение раскладываемой в ряд функции $f(t)$ в момент времени $t = nT_c / 2$.

Следовательно, функция с ограниченным спектром полностью определяется своими значениями в дискретные моменты времени. Для восстановления функции (описывающей колебания, с ограниченным спектром) в месте приема, достаточно передать по каналу связи только отдельные ее значения. Интервалы времени при этом должны быть равны половине периода наивысшей частоты спектра. Это можно осуществить с помощью коротких импульсов, амплитуды которых пропорциональны a_k . Такими импульсами могут быть дельта - функции Дирака. Вместо $f(t)$, можно передать:

$$F(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f\left(\frac{k\pi}{\omega_c}\right) \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \exp(-i\omega \frac{k\pi}{\omega_c}) \exp(i\omega t) d\omega = \pi^{-1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k\pi / \omega_c) \sin(\omega_c t - k\pi) / (\omega_c t - k\pi).$$

Таким образом, чтобы восстановить функцию $f(t)$ на приемном конце, достаточно колебания $F(t)$ пропустить через фильтр нижних частот с полосой

пропускания ω_c . Так как спектр функции $F(t)$ равен $\sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k\pi / \omega_c) \delta(t - kT_c / 2)$,

выходные колебания фильтра будут

$$(0,5 / \pi) \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k\pi / \omega_c) \int_{-\omega_c}^{\omega_c} \exp(-i\omega \frac{k\pi}{\omega_c}) \exp(i\omega t) d\omega = \pi^{-1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k\pi / \omega_c) \sin(\omega_c t - k\pi) / (\omega_c t - k\pi),$$

пропорциональные $f(t)$.

Несмотря на то, что встречающиеся суммы содержат бесконечное число членов, в

действительности число передаваемых значений колебаний $f(t)$ ограничено и определяется длительностью колебаний T и шириной их полосы частот ω_c , $f_c = \omega_c / T$, $N = 2T / T_c = 2Tf_c$.

Величина N является зависимой от количества информации, содержащейся в сигнале $f(t)$ (точнее от $N+1$, так как число точек на единицу больше числа интервалов). Ширина спектра f_c определяется $t_{мин}$ длительностью наиболее мелкой составляющей колебаний. Можно считать $f_c = (t_{мин})^{-1}$, т. е. $t_{мин} = T_c$. Тогда, интервал отсчета должен составлять половину длительности наиболее кратковременной характерной части колебания. Для более точного воспроизведения колебаний необходимо передать по каналу связи большее количество информации о нем. При зависимости сигналов от пространственной координаты, в качестве его продолжительности принимается длина транспаранта L , на котором он записан, а в качестве периода T_c - размер наиболее мелкой детали $l_{мин}$. Колебания полностью определяется значениями, взятыми через интервал $l_{мин}/2$. Если на транспаранте записан двумерный сигнал (изображение) размером $L_1 \times L_2$, необходимо $\frac{2L_1}{l_{мин1}} \cdot \frac{2L_2}{l_{мин2}}$

точек. Так как $S_{мин} = l_{мин1} \cdot l_{мин2}$ площадь самой мелкой детали $S = L_1 L_2$ - площадь транспаранта, то необходимое число точек равно $\frac{4S}{S_{мин}}$. Данное число определяет

объем информации, записанный на транспаранте. Для превращения непрерывного изображения в дискретное, может быть использована двумерная дифракционная решетка, в которой расстояния между отверстиями не превышают $0,5l_{мин}$. Примерная схема процесса следующая. На транспаранте записано дискретное сообщение, оно освещается плоской электромагнитной волной. В фокальной плоскости линзы L_1 образуется поле, изменяющееся по такому же закону, как спектральная плотность сигнала, записанного на T_1 . Диффрагма D , расположенная в этой плоскости, производит фильтрацию сигнала. Ширина отверстия диффрагмы должна равняться $\frac{2\lambda f}{l_{мин}}$, где f - фокусное расстояние; λ - длина волны. Операцию преобразования Фурье

осуществляет система, состоящая из линз и примыкающих к ней пространств ограниченных плоскостями расстояние между которыми f . Поэтому поле в плоскости диффрагмы пропорционально спектру сигнала. Для восстановления сигнала после фильтрации необходимо еще раз применить преобразование Фурье. Эту операцию сделает линза L_2 с примыкающими слоями пространства. В результате получаем непрерывное изображение в плоскости T_2 . Если длительность сигнала ограничена (ограничено определенными размерами изображение), то теорему отсчетов можно

применить к спектральной плотности $G(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} G(k\Omega) [\sin \pi \left(\frac{\omega}{\Omega} - k \right) / \pi \left(\frac{\omega}{\Omega} - k \right)]$, где

$\Omega = \frac{2\pi}{T}$; T - длительность сигнала.

Для изображения предмета (оптического сигнала) $\omega = 2\pi x / (\lambda f)$, $T = L$. Расстояние между штрихами дифракционной решетки, преобразующей $G(\omega)$ в дискретную функцию, определено из условия $2\pi x / (\lambda f) = 2\pi / L$, откуда $x = \lambda f / L$. В данном случае потребуется дифракционная решетка с большей плотностью отверстий, чем при дискретизации самого сигнала.

Комплексный сигнал. В радиоэлектронике и оптоэлектронике, сигнал понимается как результат процесса модуляции. Процесс модуляции состоит в управлении одних колебаний (высокочастотных), другими колебаниями (низкочастотными), несущими информацию. Математическое описание сигнала в оптических информационных технологиях различны, например, ориентируясь на работы [7-10], сигнал понимается как сложные колебания, например, напряжения, описываемые в форме $u = A(t)\cos[\omega_0 t + \varphi(t)]$, где A и φ - медленно изменяющиеся функции времени (или пространственные координаты); ω_0 - некоторая средняя достаточно высокая частота основного колебания (несущая). Другой пример математического описания сигнала: $u = A(t)\cos[(\omega_0 + \Delta\omega)t + \varphi(t) - \Delta\omega t]$, $\Delta\omega \ll \omega_0$, где $\omega_0 + \Delta\omega$ - несущая изменяющаяся незначительно по частоте, $\varphi(t) - \Delta\omega t$ - также медленно изменяющаяся функция.

Для примера рассмотрим амплитудно-модулированный (АМ) сигнал. $u = u_0(1 + m\cos\Omega t)\cos\omega_0 t$, $\Omega < \omega_0$, $m < 1$. Амплитуда этого сигнала изменяется по закону $u_0(1 + m\cos\Omega t)$. Понятие об амплитуде связывается с модулем, а фазы - с аргументом комплексной функции $u = A(t)e^{i\psi(t)}$. Амплитуда $|u| = A(t)$, а фаза $\arg u = \psi(t)$. Используя выражение для описания АМ сигнала, построим другую, комплексную функцию так, чтобы $A = u_m = u_0(1 + m\cos\Omega t)$; а $\operatorname{Re} u = A\cos\psi = u_0(1 + m\cos\Omega t)\cos\omega_0 t$; отсюда $\psi = \omega_0 t$. Таким образом, комплексная функция описывающая сигнал имеет вид $u = u_0(1 + m\cos\Omega t)e^{i\omega_0 t}$. Напряжение АМ сигнала, состоит из трех гармонических составляющих: $u = u_0 \cos\omega_0 t + \frac{mu_0}{2} \cos(\omega_0 + \Omega)t + \frac{mu_0}{2} \cos(\omega_0 - \Omega)t$. Каждой гармонической составляющей соответствует два комплексных вектора вида $e^{i\omega t}$ и $e^{-i\omega t}$, вращающихся в противоположных направлениях. Векторы изменяются с частотами $(+\omega)$ и $(-\omega)$. Для положительных частот, выделим соответствующие вектора:

$$u_+ = \frac{u_0}{2} e^{i\omega_0 t} + \frac{mu_0}{4} e^{i\omega_0 t + i\Omega t} + \frac{mu_0}{4} e^{i\omega_0 t - i\Omega t} = \frac{u_0}{2} e^{i\omega_0 t} \left(1 + \frac{m}{2} e^{i\Omega t} + \frac{m}{2} e^{-i\Omega t} \right) = \frac{u_0}{2} (1 + m\cos\Omega t) e^{i\omega_0 t}.$$

Путем преобразований, получим функцию вида: $u = u_0(1 + m\cos\Omega t)\cos\omega_0 t$, $\Omega < \omega_0$. Следовательно, амплитудно-модулированный сигнал получается из последнего выражения при умножении его на два.

Таким образом, общий прием построения комплексного сигнала состоит в отбрасывании составляющих с отрицательными частотами и умножении результата на два. Пусть имеется действительный модулированный сигнал $u_1(t)$ со спектральной плотностью $G_1(\omega)$. Комплексный сигнал, соответствующий $u_1(t)$,

$u(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} G_1(\omega) e^{i\omega t} d\omega$. Спектральная плотность $G(\omega)$ комплексного сигнала $u(t)$

связана со спектральной плотностью $G_1(\omega)$ действительного сигнала $u_1(t)$ соотношением $G(\omega) = 2G_1(\omega) \cdot 1(\omega)$ и отличается от нее на величину

$$G_2(\omega) = 2G_1(\omega) \cdot 1(\omega) - G_1(\omega) = 2G_1(\omega) \left[1(\omega) - \frac{1}{2} \right] = 2G_1(\omega) \gamma(\omega),$$

где, как и раньше, $\gamma(\omega) = 1(\omega) - 0,5$. Введем обозначение функции в виде $iu_2(t)$, соответствующую спектральной плотности $G_2(\omega)$. Тогда комплексный сигнал будет представлять

выражение вида: $u = u_1(t) + iu_2(t)$. Так как спектральной плотности $G_1(\omega)$ соответствует сигнал $u_1(t)$, а $\gamma(\omega)$, сигнал $1/(2\pi)$, то на основании формулы свертки

спектральной плотности $G_2(\omega)$ соответствует сигнал $u_2(t) = \frac{i}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u_1(\tau)}{t-\tau} d\tau$, откуда

$$u_2(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u_1(\tau)}{t-\tau} d\tau, \text{ причем, здесь следует брать главное значение интеграла, т. е.}$$

$$u_2(t) = \frac{1}{\pi} \lim_{\substack{\varepsilon \rightarrow 0 \\ \mu \rightarrow 0}} \left[\int_{-\mu}^{t-\varepsilon} \frac{u_1(\tau)}{t-\tau} d\tau + \int_{t+\varepsilon}^{\mu} \frac{u_1(\tau)}{t-\tau} d\tau \right].$$

Выражение $u_2(t)$ отображает

интегральное преобразование Гильберта: $u_2(t) = Hu_1(t)$, $H = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\{\dots\}}{t-\tau} d\tau$.

Откуда следует, что комплексный сигнал можно создать следующим образом: вещественная часть равна заданному сигналу, а мнимая, сигналу, полученному из заданного применением к нему преобразования Гильберта. Так как

$$G_2(\omega) = G_1(\omega) \cdot 2\gamma(\omega), \quad \omega \neq 0, \quad \text{то} \quad G_1(\omega) = G_2(\omega) \frac{1}{2\gamma(\omega)} = G_2(\omega) \cdot 2\gamma(\omega);$$

$u_1(t) = \frac{i}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{uu_2(\tau)}{t-\tau} d\tau = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u_2(\tau)}{t-\tau} d\tau$, т. е. обратное преобразование Гильберта равно прямому преобразованию с обратным знаком:

$$H^{-1} = -H = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\{\dots\}}{t-\tau} d\tau.$$

Если комплексный сигнал имеет представление в виде $u(t) = u_1(t) + iu_2(t) = |u|e^{i\psi} = |u|\varepsilon^{i\arg u}$, амплитуда, фаза и частота выглядят в

следующей форме: $A(t) = |u(t)| = \sqrt{u_1^2(t) + u_2^2(t)}$; $\psi(t) = \arg u(t) = \arctg \frac{u_2(t)}{u_1(t)}$;

$$\omega(t) = \frac{d\psi(t)}{dt}.$$

Спектральная плотность модулированных колебаний (сигнала). При представлении колебаний в комплексной форме $A(t)\exp[i\varphi(t)]$, сигнал (колебания над которыми совершен процесс модуляции) можно записать в следующем виде:

$u(t) = A(t)e^{i\varphi(t) + i\omega_1 t}$, где ω_1 - несущая частота. Допустим, основные колебания (несущая) модулированы по амплитуде и фазе (или частоте). Спектральная плотность сигнала

$u(t)$ определяется преобразованием Фурье $G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} A(t)e^{i\varphi(t)+i\omega t} e^{-i\omega t} dt$. Стоящая под знаком интеграла функция, описывает модулированный сигнал, полная фаза которого $\Phi(t) = \varphi(t) + \omega_1 t - \omega t$, а частота $\Omega = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{d\varphi(t)}{dt} + \omega_1 - \omega$. Пусть начальная фаза управляющих колебаний $\varphi(t)$ имеет только один экстремум в точке $t = t_1$. Вблизи этой точки $\varphi(t) = \varphi(t_1) + 0,5\varphi''(t_1)(t-t_1)^2 + \dots$, так как $\varphi'(t_1) = 0$. Частота подынтегральной функции $\Omega = \varphi''(t_1)(t-t_1) + \omega_1 - \omega$. В момент $t = t_0$ частота $\Omega(t_0) = 0$ и $\varphi''(t_1)(t-t_1) + \omega_1 - \omega = 0$, откуда, положение стационарной точки определяется из выражения $t_0 = t_1 + \frac{\omega - \omega_1}{\varphi''(t_1)}$. Вблизи t_0 подынтегральная функция почти не изменяется,

а вдали, изменяется очень быстро. Если функция $A(t)$ изменяется медленно, можно считать, что вблизи t_0 она постоянна и равна $A(t_0)$. Интегрирование по области вдали от t_0 , даст практически нулевой результат, так как площадь попеременно принимает приближенно равные и противоположные по знаку значения [13-15]. Интегрирование в бесконечных пределах можно заменить интегрированием по ограниченной области изменения t , в которой $A(t) \approx const$. Но тогда $A(t_0)$ можно вынести за знак интеграла и спектральная плотность принимает вид:

$$G(\omega) = A(t_0) \int_{t_0-\varepsilon}^{t_0+\varepsilon} \exp \left[i \left[\varphi(t_1) + \frac{1}{2} \varphi''(t_1)(t-t_1)^2 + \omega_1 t - \omega t \right] \right] dt$$

Интегрирование по области 2ε предлагается заменить по бесконечным пределам, так как значения интегралов в областях $t < t_0 + \varepsilon$ и $t > t_0 - \varepsilon$ почти равны нулю. Таким образом, предыдущее выражение может быть представлено в виде

$$G(\omega) = A(t_0) \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[i \left[\varphi(t_1) + \frac{1}{2} \varphi''(t_1)(t-t_1)^2 + \omega_1 t - \omega t \right] \right] dt$$

Преобразуем степень экспоненты под знаком интеграла [16]:

$$\left[\sqrt{\frac{\varphi''(t_1)}{2}}(t-t_1) \right]^2 + 2\sqrt{\frac{\varphi''(t_1)}{2}}(t-t_1) \frac{\omega_1 - \omega}{2\sqrt{\frac{\varphi''(t_1)}{2}}} + \left(\frac{\omega_1 - \omega}{2\sqrt{\frac{\varphi''(t_1)}{2}}} \right)^2 + \varphi(t_1) + t_1(\omega_1 - \omega) - \left(\frac{\omega_1 - \omega}{2\sqrt{\frac{\varphi''(t_1)}{2}}} \right)$$

и введем переменную

$$x = \sqrt{\frac{\varphi''(t_1)}{2}}(t-t_1) + \frac{\omega_1 - \omega}{2\sqrt{\frac{\varphi''(t_1)}{2}}}$$

Тогда, $G(\omega) = A(t_0) \sqrt{\frac{2i\pi}{\varphi''(t_1)}} \exp \left\{ i\varphi(t_1) + it(\omega_1 - \omega) - i \left(\frac{\omega_1 - \omega}{2\sqrt{\frac{\varphi''(t_1)}{2}}} \right)^2 \right\}$. Видно, что

модуль спектральной плотности пропорционален $A(t_0) a\left(t_1 + \frac{\omega_1 - \omega}{\varphi''(t_1)}\right)$, что означает, что спектральная плотность так же зависит от частоты, как A от t , в измененном масштабе.

Рассмотрим ЧМ сигнал с линейной частотной модуляцией, пусть частота равна $\frac{d\varphi}{dt} = \beta t$, а фаза $\varphi = \frac{\beta t^2}{2}$. Она принимает экстремальное значение при $t_1 = 0$. В этот момент $\varphi(0) = 0$, $\varphi''(0) = \beta$, тогда спектральная плотность должна быть соответственно равной $G(\omega) = A\left(\frac{\omega - \omega_1}{2\beta}\right) \sqrt{\frac{2i\pi}{\beta}} \exp - i\left(\frac{\omega_1 - \omega}{2\beta}\right)^2$. При огибающей сигнала прямоугольной формы, $|G(\omega)|$ имеет такую же форму. Так как $A(t) = 0$ при $t < -\frac{t_u}{2}$ и $t > \frac{t_u}{2}$, то $|G(\omega)|$ при $\omega < \omega_1 - \frac{\beta t_u}{2}$ и $\omega > \omega_1 + \frac{\beta t_u}{2}$.

Ширина спектра βt_u - обусловлена девиацией частоты. Если сравнивать сигналы, у которых одинакова скорость изменения частоты, то более широкий спектр будет соответствовать сигналам большей длительности. Применение согласованного фильтра при обработке ЛЧМ сигналов дает возможность сжать принимаемый сигнал до значения $1/(\Delta f_2) = 2\pi/(\Delta\omega) = 2\pi/(\beta t_u)$, а коэффициент сжатия будет равен $\beta t_u/(2\pi)$ и может достигать нескольких сотен и даже тысяч.

Выводы:

- носителем информации в оптических информационных технологиях, в частности, оптических системах ее обработки, является электромагнитное поле. Сигналы такой системы могут быть одномерными (функции координат или времени) или многомерными (изображения), функции координат и времени;

- показаны математические описания сигналов имеющих пространственную и временную природу (изображений), в частности, сигналов с ограниченным спектром, которые описываются функциями с ограниченным спектром и определяются своими значениями в дискретные моменты времени. Для превращения непрерывного изображения в дискретное, как одно из существующих решений, предлагается использовать двумерную дифракционную решетку с определенной геометрией отверстий;

- показано, что известный в радиоэлектронике комплексный сигнал, связывающий понятие об амплитуде - с модулем, а фазы – с аргументом, описываемый комплексной функцией, в оптических информационных технологиях может быть «построен» путем отбрасывания составляющих с отрицательными частотами и умножении результата на два. Второй возможный вариант создания комплексного сигнала предлагается путем уравнивания вещественной части заданному сигналу, а мнимой, сигналу полученному из заданного подвергнутого преобразованию Гильберта;

- показано, что спектральная плотность модулированных колебаний (сигналов), для которых одинакова скорость изменения частоты, будет иметь более широкий спектр для сигналов большей длительности. Применение согласованного фильтра дает возможность сжать принимаемый сигнал, а коэффициент сжатия может достигать сотен тысяч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богомаз У. Г. Оптические информационные технологии построения систем формирования изображений / У. Г. Богомаз, Т. В. Белик, В. В. Данилов // Вісник Донецького університету. Сер. А : Природничі науки. – 2013. – № 1. – С. 164-172.
2. Богомаз У. Г. Информационная технология определения функции передачи оптической системы построения изображений / У. Г. Богомаз, Т. В. Белик, В. В. Данилов // Радиотехника : всеукр. науч.-техн. сб. – Харьков : Изд-во Харьк. техн. ун-та радиоэлектроники, 2013. – №175. – С. 127-133.
3. Оптические информационные технологии. Преобразование радиосигналов / И. А. Третьяков, М. Л. Павлов, Т. С. Тебенева, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Сер. А : Естественные науки. – 2016. – № 2. – С 83-89.
4. Оптические информационные технологии. Обработка радиосигналов / И. А. Третьяков, М. Л. Павлов, Т. С. Тебенева, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Сер. А : Естественные науки. – 2016. – № 3. – С 40-49.
5. Оптические информационные технологии. Элементная база / И. А. Третьяков, Т. В. Белик, А. П. Ефимович, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Сер. А : Естественные науки. – 2016. – № 4. – С 40-49.
6. Оптические информационные технологии. Неуправляемые модуляторы / И. А. Третьяков, Т. В. Белик, А. П. Ефимович, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Сер. А : Естественные науки. – 2017. – № 1. – С 61-68.
7. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники : в 2 т. Т. 2 / ред. : Б. Х. Кривицкий, В. Н. Дулин. – Москва : Энергия, 1977. – 471 с. – (Справочная серия «Радиоэлектроника»).
8. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники : в 2 т. Т. 1 / ред. : Б. Х. Кривицкий, В. Н. Дулин. – Москва : Энергия, 1977. – 504 с. – (Справочная серия «Радиоэлектроника»).
9. Парыгин В. Н. Оптическая обработка информации / В. Н. Парыгин, В. И. Балакший. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1987. – 142 с.
10. Литвиненко О. Н. Основы радиооптики / О. Н. Литвиненко. – Киев : Техніка, 1974. – 206 с.
11. Гудмен Дж. У. Введение в Фурье-оптику : пер. с англ. / Дж. У. Гудмен ; пер. М. П. Головея, В. Ю. Галицкого ; под ред. Г. И. Косоурова. – Москва : Мир, 1970. – 364 с.
12. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров / Андре Анго ; пер. с фр. К. С. Шифрина ; с предисл. Луи де Бройля. – Москва : Наука. Физматлит, 1965. – 780 с.
13. Акаев А. А. Оптические методы обработки информации : [для вузов по специальности «Электронные вычислительные машины»] / А. А. Акаев, С. А. Майоров. – Москва : Высш. шк., 1988. – 236.[1] с.
14. Ярив А. Введение в оптическую электронику / А. Ярив ; пер. с англ. Г. Л. Киселева ; под ред. О. В. Богданкевича. – Москва : Высш. шк., 1983. – 398 с.
15. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех / Н. С. Шестов. – Москва : Сов. радио, 1967. – 348 с.
16. Двайт Г. Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г. Б. Двайт ; пер. с англ. Н. В. Леви ; под ред. К. А. Семендяева. – 5-е изд. – Москва : Наука, 1977. – 224 с.

Поступила в редакцию 12.03.2019 г.

OPTICAL INFORMATION TECHNOLOGIES. SPECTRAL REPRESENTATION OF SIGNALS

V. Danilov, V. Timchenko, I. Tretiakov

The paper considers the basics of a physical description of the processes of information transformation and transfer by multidimensional signals (images), depending, in the general case, on four variables (three spatial coordinates and time). It is shown that this feature of the spectral range has led to the possibility of a significant increase in the speed and volume of processed information.

Keywords: optical information technology, optical processing system, spectral density, reference function, Hilbert transform.

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.

Тимченко Владимир Иванович

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

Timchenko Vladimir

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

Третьяков Игорь Александрович

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

Tretiakov Igor

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

УДК 669.184-412:539.4.011

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ НА ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРУГЛЫХ ЗАГОТОВОК

© 2019 С.В. Гридин

В работе выполнено численное исследование влияния скоростного режима непрерывного литья слитков круглого сечения на их напряженно-деформированное состояние в период разливки. Скоростной режим оказывает существенное влияние на образование дефектов в непрерывнолитой заготовке. Возникающие напряжения могут вызывать появление трещин и остаточных деформаций, которые ухудшают качество готовой продукции.

Ключевые слова: непрерывная разливка; круглая заготовка; кристаллизатор; скорость разливки; предел текучести; глубина жидкой лунки; толщина твердой оболочки; напряжения; деформация, численное моделирование.

Введение. Использование непрерывнолитых круглых заготовок позволяет сократить на 20-30% затраты на производство готовой продукции и уменьшить расход металла от 30 до 150 кг/т, в зависимости от способа производства и исходного сечения заготовки [1]. В условиях конкуренции к качеству металлопродукции потребителями предъявляются все более жесткие требования соблюдения качества на уровне международных стандартов [1], где предусмотрена определенная система контроля, базирующаяся на современных технологических процессах производства и непрерывной разливки стали. Режим работы машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) оказывает существенное влияние на внутренние дефекты (осевая пористость, внутренние трещины, подповерхностные пузырьки и т.п.), качество поверхности литой заготовки и на другие параметры (глубина следов от качания кристаллизатора, колебания диаметра заготовки, овальность, кривизна и др.).

В качестве примера таких внутренних и внешних дефектов на рис. 1 представлены фотографии, полученные в 2008 г. по результатам разливки круглой сортовой заготовки $\varnothing 150$ мм из стали марки ст.40Х в условиях ЗАО «Миниметаллургический завод «ИСТИЛ»», г.Донецк (с 2009 г. - АО (частное) «Донецкий электрометаллургический завод», с июня 2016 г. - ГП «Юзовский металлургический завод»).

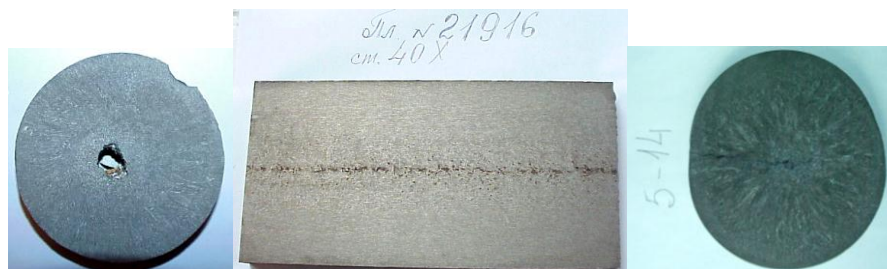


Рис. 1. Фотографии внутренних и внешних дефектов круглой заготовки $\varnothing 150$ мм

Для предотвращения случаев возникновения внутренних и внешних дефектов (особенно трещин) наиболее важной является оценка напряженного состояния круглой сортовой заготовки. На основе промышленного опыта эксплуатации МНЛЗ установлено [2-4], что это комплексная проблема, для решения которой необходимо в общем случае рассмотреть ряд взаимосвязанных явлений и факторов, влияющих на процесс формирования непрерывнолитой заготовки. При этом во избежание внутренних и поверхностных дефектов слитка, разрывов металла особое внимание необходимо уделить скорости разливки, определяющей температурное поле заготовки и ее напряженно-деформированное состояние.

На сегодняшний день применяются такие системы управления технологическими параметрами, как регулирование температуры жидкого металла, контроля перепада температур охлаждающей кристаллизатор воды и ее расхода, а также регулирования скорости вытягивания слитка.

Наиболее эффективной из них считается система регулирования скорости вытягивания слитка, т.к. рациональные значения основных параметров технологии (прежде всего – интенсивность вторичного охлаждения и условия формирования заготовки в линии МНЛЗ) напрямую связаны со скоростью разливки, а управление по температуре металла и перепаду температур охлаждающей воды обладает большой инертностью. Система регулирования скорости вытягивания слитка позволяет автоматически управлять технологическим процессом, устранять возможные прорывы жидкого металла и снижать дефекты различного происхождения. Поэтому при исследовании технологии непрерывного литья можно рассматривать зависимость напряженно-деформированного состояния круглой стальной заготовки от скорости разливки жидкой стали в первом приближении на основе анализа результатов численного моделирования.

Постановка проблемы. При прохождении затвердевающей заготовки по технологической линии МНЛЗ в затвердевшей корочке возникают напряжения и деформации, которые обусловлены действием ряда технологических параметров: ферростатическим давлением жидкого металла, интенсивностью отвода тепла, конструкцией и точностью настройки элементов зоны первичного и вторичного охлаждения.

Возникающие напряжения влияют на образование трещин. Установлено, что уже в первые секунды затвердевания распределение температур в оболочке и в жидкой фазе кристаллизующегося круглого слитка характеризуется заметной неравномерностью [2, 4-6]. Такое распределение температур по сечению заготовки связано с непрерывным отводом тепла по периметру формирующейся в кристаллизаторе заготовки и характером движения конвективных потоков в верхней ее части. Поэтому степень неравномерности фронта затвердевания можно полагать определяющим фактором, от которого зависит возникновение и развитие дефектов поверхности, искажение профиля поперечного сечения и характер распределения неметаллических включений.

Скорость нарастания оболочки и ее толщина в данной точке пропорциональна температуре поверхности заготовки. Существенный разброс значений (до 100...200°C) по периметру наблюдается уже через 5-6 с после начала затвердевания на расстоянии 30-50 мм от мениска [5, 7, 8]. В дальнейшем эта неравномерность усиливается и достигает 200-250°C на расстоянии 0,4-0,5 м от мениска [8].

Степень неравномерности распределения температуры и, как следствие, толщины оболочки по окружности сечения тем больше, чем больше диаметр заготовки. Наибольшая неравномерность фронта затвердевания наблюдается в верхних

горизонтах, но на расстоянии приблизительно 500 мм от мениска она стабилизируется и далее, в пределах кристаллизатора, сохраняется на постоянном значении для каждого слитка (от 10 до 14%).

Таким образом, одним из наиболее важных узлов, определяющих рациональную работу МНЛЗ и оптимальное качество непрерывно литой заготовки, является кристаллизатор [8, 9]. Именно в нем происходит частичный переход жидкой стали в твердое состояние – процесс коркообразования. Кристаллизатор должен обеспечить быстрое формирование достаточно толстой и прочной корки без дефектов. В процессе непрерывного литья корочка затвердевающей в кристаллизаторе заготовки по мере своего движения вниз претерпевает усадку и отходит от стенок [8, 9]. Зона плотного контакта корочки со стенками находится в верхней части кристаллизатора, далее при вытягивании слитка может произойти разрыв корочки в местах ее отхода от стенок.

Для достижения качественного производства заготовок необходимо поддерживать равномерность температур в нарастающей твердой корочке заготовки при минимальных допустимых колебаниях во времени температур в стенках кристаллизатора. Распределение температур или температурных полей по периметру кристаллизатора (т.е. температурная симметрия в поперечном сечении), и их временные колебания напрямую связаны с качеством заготовки, особенно с равномерностью толщины твердой корочки, ромбовидностью ее сечения, неровностями поверхности, а также с износом кристаллизатора. Качественная продукция определяется интенсивностью и равномерностью отвода тепла в кристаллизаторе (зона первичного охлаждения заготовки), влияющими на равномерность роста толщины твердой корки по периметру поперечного сечения и в направлении литья, т.е. во времени. Отвод тепла в определенном месте кристаллизатора должен быть по мере возможности симметричным, равномерным по периметру поперечного сечения и постоянным во времени. Несимметричный отвод тепла в поперечном сечении и избыточные температурные колебания вызывают в твердой корке механические напряжения, при превышении критических величин которых возникают трещины.

Трещины представляют собой пониженное термическое сопротивление, а поэтому температура стенки кристаллизатора вблизи трещин резко повышается [7, 9]. Время, при котором трещина достигнет нижнего края кристаллизатора, обычно не превышает нескольких десятков секунд, и зависит от скорости разливки [8]. Трещина обычно не является симметричной, а возникает в определенном месте, и постепенно расширяется в стороны (рис. 2 [4]). Температуры растут в отдельных местах, поэтому проявлением трещины является не только резкий рост температур, а и резкое нарушение симметрии температурного поля кристаллизатора.

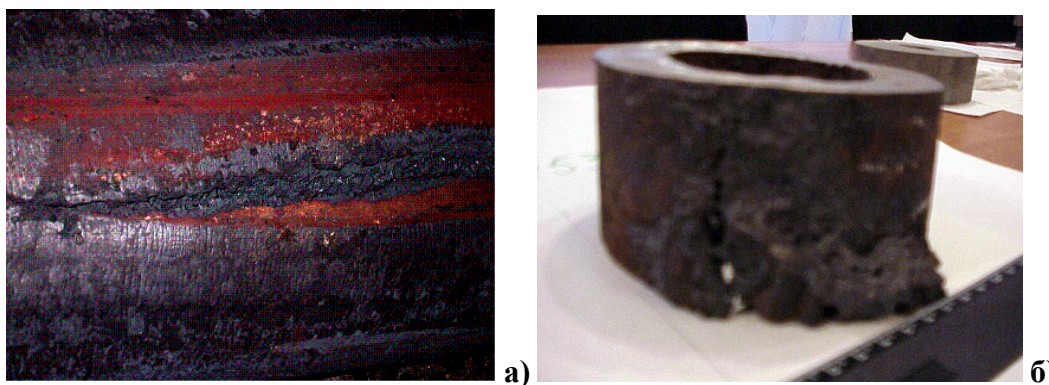


Рис. 2. Фотография продольной трещины круглого слитка $\varnothing 150$ мм до (а) и после (б) прорыва [4]

Если временное понижение температур возникло из-за снижения скорости разливки, то прорыв может быть упрежден и отведен только на основе трения. Это касается случая возникновения продольной трещины (рис. 2 [4]) в период опасности прорыва.

На формирующуюся твердую корочку в кристаллизаторе действуют компоненты механического напряжения, из которых самыми важными являются ферростатическое давление жидкого ядра заготовки и сила трения. Далее корка нагружается температурными напряжениями из-за интенсивного отвода тепла и сил, возникающих из-за воздействия роликов зоны вторичного охлаждения (ЗВО) либо из-за неисправной наладки технологической оси. Кроме того, корка в ЗВО нагружается чередующимися напряжениями на растяжении при загибе и на сжатии при разгибе заготовки. Растягивающие напряжения могут при превышении предельных значений предела прочности материала заготовки приводить к возникновению поперечных трещин и даже к прорыву.

Неблагоприятное распределение температурных напряжений может быть изменено корректировкой режимов теплоотвода от заготовки в ЗВО [7]. Традиционно в системе ЗВО сортовых МНЛЗ используют водяное охлаждение со ступенчатым изменением интенсивности в 3-4 зонах. Такая схема полностью удовлетворяет требованиям разливки квадратной заготовки, но для условий затвердевания круглой сортовой заготовки требуется определенная коррекция подачи охлаждающей воды к поверхности заготовки.

Во-первых, это связано с тем, что для круглой заготовки может происходить нарушение симметричности положения форсунок относительно оси заготовки из-за недостаточно жесткого фиксирования положения заготовки при ее перемещении вдоль технологической оси [2]. Смещение оси факела форсунки приводит к ее неравномерному охлаждению и обуславливает формирование целой группы дефектов.

Во-вторых, круглая заготовка имеет меньшую поверхность отвода тепла, это в совокупности с несимметричной подачей охлаждающей воды приводит к отклонению от оптимальных значений температуры заготовки в зоне разгиба заготовки, что повышает вероятность появления внутренних трещин.

Величина температурных напряжений в заготовке, особенно на участке разгиба в зоне окончания жидкой лунки, может превышать предел текучести стали, что обуславливает значительную вероятность появления остаточных деформаций, овальности и колебаний величины диаметра заготовки.

При наиболее высоких температурах заготовки в ЗВО под кристаллизатором твердая оболочка заготовки обладает большим запасом пластичности. Это выражается в проявлении т.н. ползучести стальной оболочки. Теоретически наиболее неблагоприятное состояние заготовки с точки зрения максимальных напряжений должно соответствовать участкам с температурой ниже 800°C, при которой сильно проявляются упругие свойства стальной заготовки [7]. При таких температурах значительно возрастает модуль упругости стали и уменьшается возможность релаксации напряжений за счет пластических деформаций [5, 8], особенно в области хвостовой части слитка.

Таким образом, можно построить структурную схему управления процессом на основе математической модели и реализовать ее с помощью вычислительного эксперимента

Основная часть. Задачей исследований являлось численное исследование условий затвердевания и деформации заготовок в ходе их упругопластического

деформирования на криволинейном участке МНЛЗ и определение механизма фазовых и структурных превращений, исключающего появление внутренних и поверхностных дефектов в напряженно-деформированной непрерывнолитой заготовке с целью разработки методического подхода к определению рациональных условий охлаждения заготовки.

В ходе теоретического исследования рассматриваются [5, 8, 10]:

1. Определение функции, описывающей температурное поле заготовки $T=T(r, z)$ и его изменение вследствие отвода тепла с поверхности заготовки.

Тепловой поток тепловом потоке с поверхности заготовки Q рассчитывается как:

$$Q = \alpha_{cm}(T_n - T_z) = \frac{\lambda}{D}(T_z - T_x) = \alpha_x(T_x - T_g), \text{ кВт/м}^2, \quad (1)$$

где: $\alpha_{ст}$ - коэффициент теплопередачи от затвердевающей стали к стенке, кВт/м² К;

T_n - температура внешней поверхности заготовки затвердевающей стали, °С;

T_g - температура «горячей поверхности» меди, °С;

T_x - температура «холодной поверхности» меди, °С;

λ - удельная теплопроводность меди, кВт/м·К;

α_x - коэффициент теплопередачи «холодной» медной стенки, кВт/м² К;

T_b - среднemasсовая температура охлаждающей воды, °С;

D - толщина меди, м.

При известном тепловом потоке с поверхности распределение температуры внутри заготовки определяется по стандартному уравнению нестационарного теплопереноса [8]. В уравнении учитывается выделение W - скрытой теплоты при фазовом переходе (кристаллизации), $W=272$ КДж/кг, и зависимость коэффициентов теплоемкости и теплопроводности от температуры (с помощью эмпирических зависимостей).

2. Кинетика затвердевания (определение доли твердой фазы, характеризующей рост твердой корочки во времени). Поле доли твердой фазы ξ_s рассчитывается по модели квазиравновесной двухфазной зоны [5, 8]:

$$\xi_s = 1 - \left(\frac{T_0 - T}{T_0 - T_L} \right)^{-1/(1-k)}, \quad (2)$$

где: T - текущая температура, °С;

T_0 - начальная температура расплава, °С;

T_g - температура «ликвидус» материала заготовки, °С, определяется по эмпирическим формулам в виде полиномиальных выражений с использованием данным о химическом составе стали [8];

k - равновесный коэффициент распределения примеси.

При известном распределении твердой фазы рассчитываются ширина и глубина жидкой лунки, ширина двухфазной области, толщина твердой корочки.

3. Определение функции, которая описывает поле термических напряжений в заготовке с учетом вязко-упругого, упруго-вязко-пластического и упруго-пластического поведения материала заготовки, а также деформаций изгиба.

4. Вычисление амплитуд вязко-упругих и упруго-вязко-пластических и термоупруго-пластических деформаций в материале заготовки, а также деформаций загиба/разгиба.

Рассматривается период прохождения заготовки через следующие области:

- кристаллизатор. При прохождении заготовки через кристаллизатор тепловой поток с поверхности определяется по эмпирической зависимости [8]. При этом считается, что на зеркале металла поддерживается постоянная температура, осцилляции кристаллизатора и конусность не учитываются. Расход воды на охлаждение кристаллизатора и скорость протекания ее в проходном сечении определяются из условий прочности корочки заготовки на выходе из кристаллизатора, достаточной для восприятия усилий от ферростатического давления и вытягивания заготовки с учетом сечения заготовки, скорости разливки, марочного сортамента и температуры стали в промковше.

- зона вторичного охлаждения. В ЗВО тепловой поток определяется по закону Ньютона-Рихмана (предполагается, что преобладающим является конвективный механизм теплоотвода). При этом коэффициент теплоотдачи определяется по расходу воды и водовоздушной смеси для каждой из секций ЗВО.

- область между ЗВО и устройством резки (охлаждение на воздухе за счет теплового излучения). При этом не рассматриваются процессы в конструктивных элементах перечисленных областей. На этом участке заготовки тепловой поток определяется по закону Стефана-Больцмана (предполагается, что преобладающим является радиационный механизм теплоотвода).

Исходные данные для проведения расчетов приведены на рис.3.

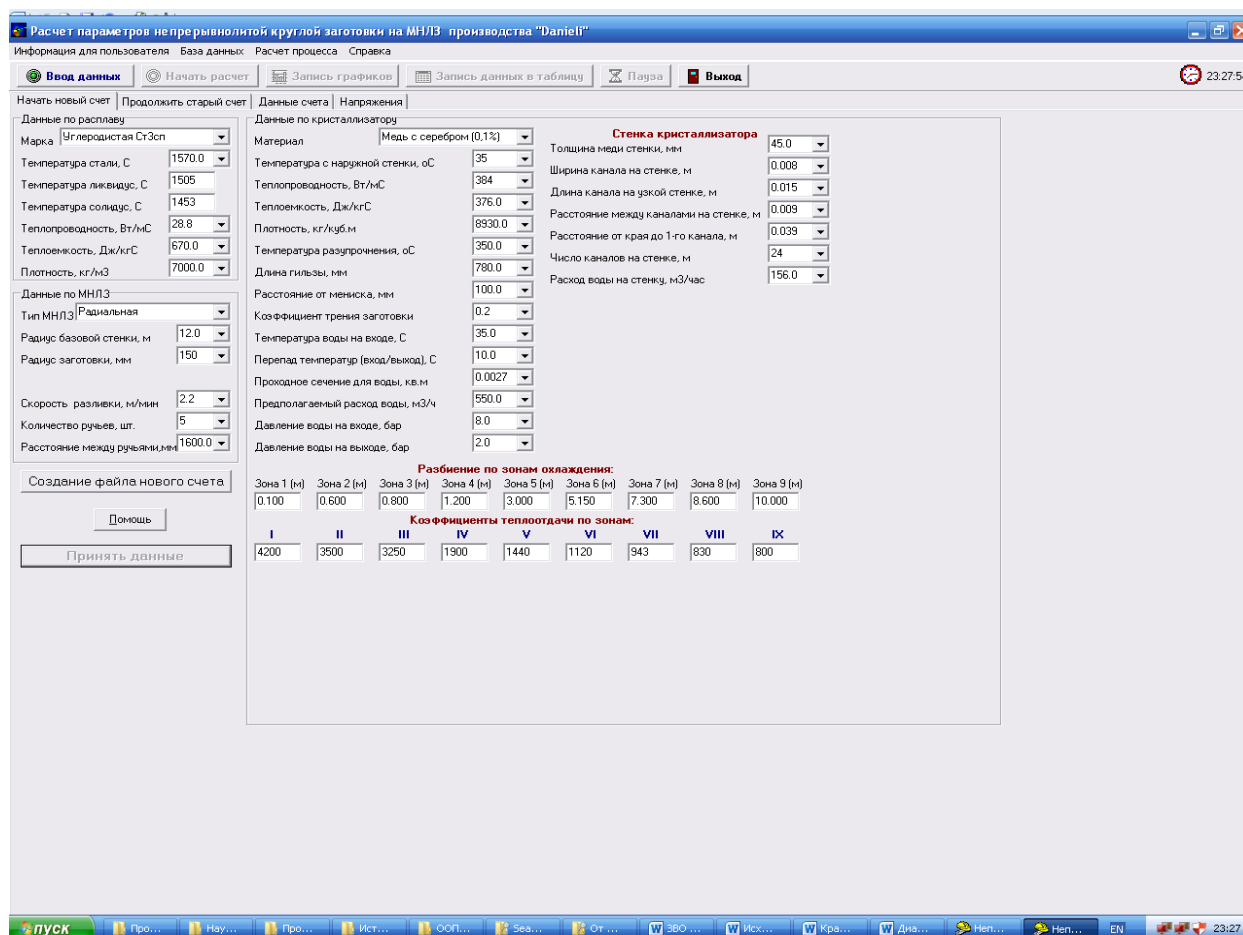


Рис. 3. Окно ввода данных расчетной программы TERM для разливки круглой заготовки диаметром $\varnothing 150$ мм и скорости литья 2,2 м/мин.

Технологические параметры процесса, используемые для задания граничных условий, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Технологические параметры процесса разливки

Температура стали в проковше, °С	1530
Температура стали в кристаллизаторе (на зеркале металла), °С	1530
Расход охлаждающей воды в кристаллизаторе, л/мин	2600
Температура охлаждающей воды на входе, °С	35
Разница температуры воды на входе и выходе, °С	10
Температура воздуха, °С	25
Температура воды в ЗВО, °С	35
Степень черноты (излучательная способность тела)	0,85
Удельная теплоемкость стали в жидком состоянии, Дж/кг·К	691
Удельная теплоемкость стали в твердом состоянии, Дж/кг·К	540
Удельная теплота плавления (затвердевания), КДж	272
Локальный коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² ·К (определяется по расходу воды и водо-воздушной смеси для каждой из секций ЗВО)	
Равновесный коэффициент распределения примеси k	0,4

Анализ результатов. В результате расчетов получены следующие параметры:

1. Тепловых процессов. На рис.4, 5 представлено распределение температур: по сечению заготовки (рис.4а), во времени на поверхности заготовки (рис.4б, красная линия) и на оси заготовки (рис.4б, зеленая линия); поле температур (температура в каждой точке заготовки, рис.5) и длина жидкой лунки (рис.5);

- тепловой поток с поверхности заготовки.

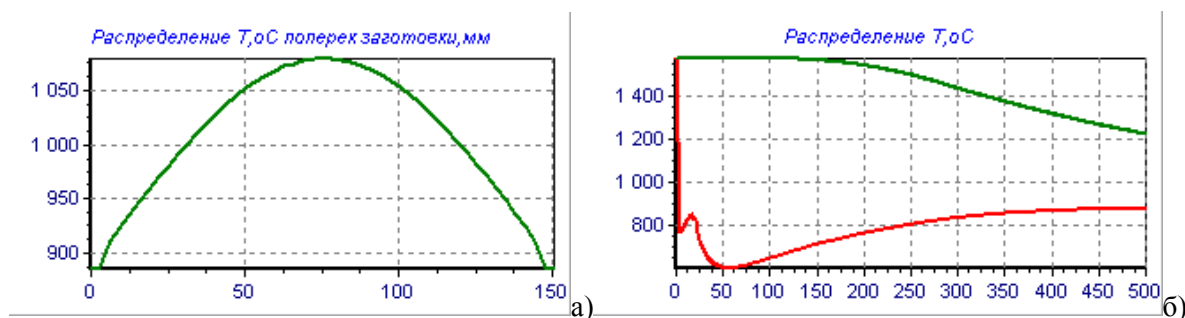


Рис. 4. Распределение температур: по сечению заготовки (а); во времени на поверхности заготовки (б, красная линия) и на оси заготовки (б, зеленая линия).

2. Кинетики затвердевания. На рис.5 представлены поле твердой фазы (процентное содержание твердой фазы в каждой точке заготовки); толщина твердой корочки в каждом сечении заготовки; ширина жидкой лунки в каждом сечении заготовки; ширина двухфазной (твердо-жидкой) области в каждом сечении заготовки и глубина жидкой лунки.

3. Термонапряженного состояния заготовки. На рис. 6 представлены поля термонапряжений с учетом эффектов релаксации материала заготовки, наращивания твердой корки заготовки и фазовых превращений, а также поле напряжений, вызванных изгибом заготовки распределение суммарных напряжений по сечению.

4. Графики распределения термонапряжений (в т.ч. суммарных напряжений) по длине заготовки и температуры на оси, поверхности и на нейтральной оси заготовки во времени (рис.7).

Расчеты проводили для условий шестиручьевого радиальной сортовой МНЛЗ. Рассматривалось тепловое и термонапряженное состояние круглой заготовки $\varnothing 150-290$

мм при отливке углеродистых марок стали. Анализ экспериментальных данных [5, 6] показывает, что на практике невозможно получить монотонное распределение температуры поверхности заготовки по длине зоны вторичного охлаждения. Можно лишь ставить задачу получения распределения температуры поверхности заготовки по длине ЗВО, которое в наибольшей степени приближено к действительному. В связи с этим в данном исследовании решали задачу нахождения распределения температуры поверхности заготовки в зависимости от задаваемой температуры в зоне газовой резки.

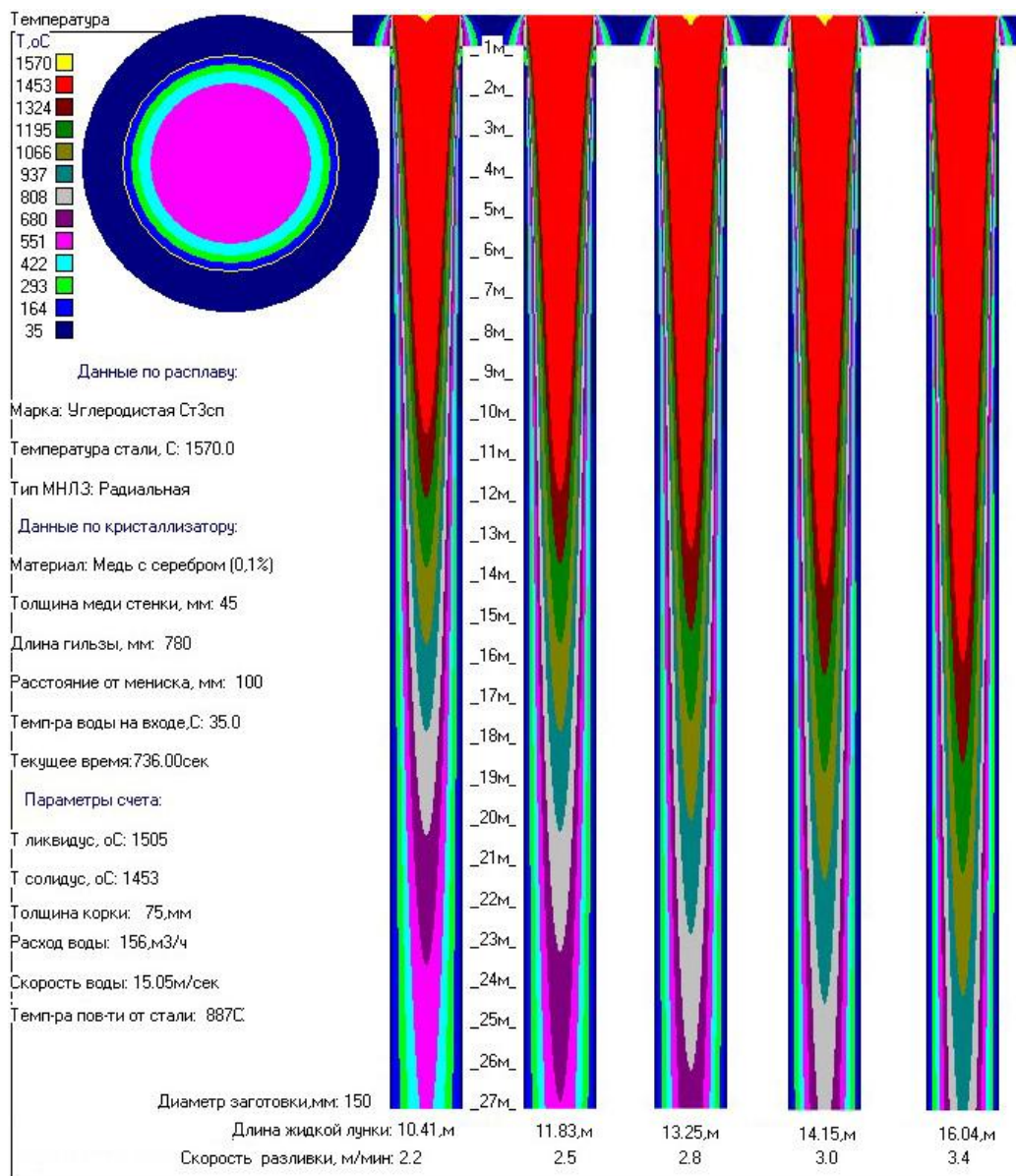


Рис. 5. Распределение поля температур по длине заготовки и длина жидкой лунки для условий разливки круглой заготовки диаметром $\varnothing 150$ мм при скоростях литья от 2,2 м/мин для 3,4 м/мин.

Исследование напряжений по сечению и по периметру заготовки позволило выявить различия в распределении напряжений (рис. 8). Во всех вариантах расчетов наблюдается рост значений напряжений сразу после окончания глубины жидкой лунки и превышение предела прочности стали напряжениями изгиба уже через 2-3 метра (в зависимости от скорости литья) от конца лунки, т.е. образование поверхностных

трещин наиболее вероятно в указанных областях (зона 4 ЗВО и прямолинейный участок).

Дальнейшее повышение качества непрерывнолитой круглой сортовой заготовки и повышение ее конкурентоспособности возможно за счет расширения применения методов защиты стали от вторичного окисления, например, при использовании разливки через систему «стопор-моноблок»-«стакан-дозатор»-«погружной стакан».

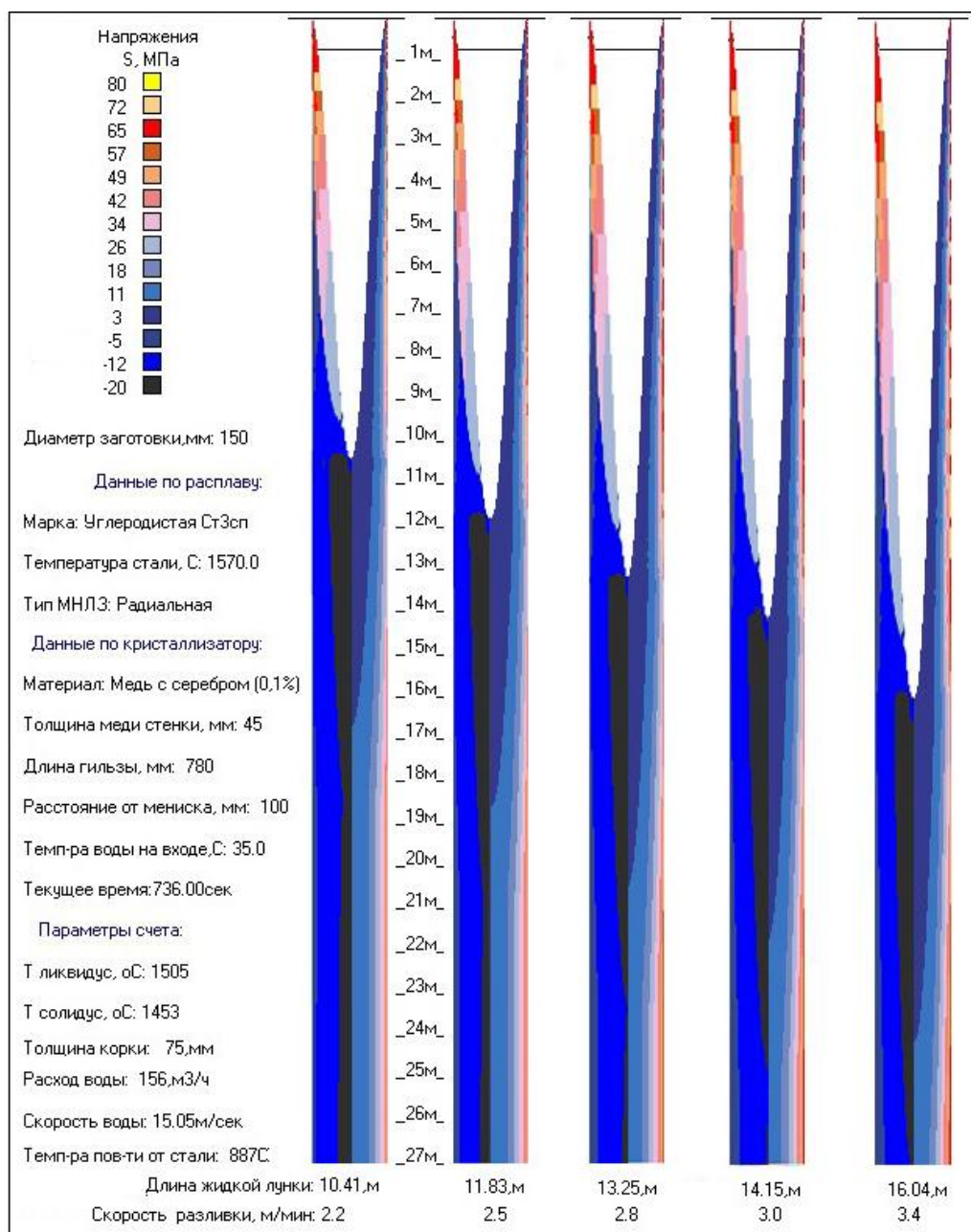


Рис. 6. Распределение полей термонапряжений с учетом эффекта наращивания твердой корки заготовки (слева) и с учетом фазовых превращений (справа) по длине заготовки для условий разливки круглой заготовки диаметром $\varnothing 150$ мм при скоростях литья от 2,2 м/мин для 3,4 м/мин.

Выводы. 1. Исследование условий возникновения и оценка величины внутренних напряжений в затвердевающей круглой заготовке могут быть выполнены с помощью математической модели [8], описывающей динамику охлаждения круглой заготовки,

учитывающей усадочные явления, скорость разливки, неравномерность охлаждения заготовки в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения, колебания температуры и химического состава стали при разливке, условия разгиба заготовки и т.п. Модель позволяет прогнозировать напряженное состояние заготовки и прогнозировать критические ситуации, соответствующие на практике образованию трещин.

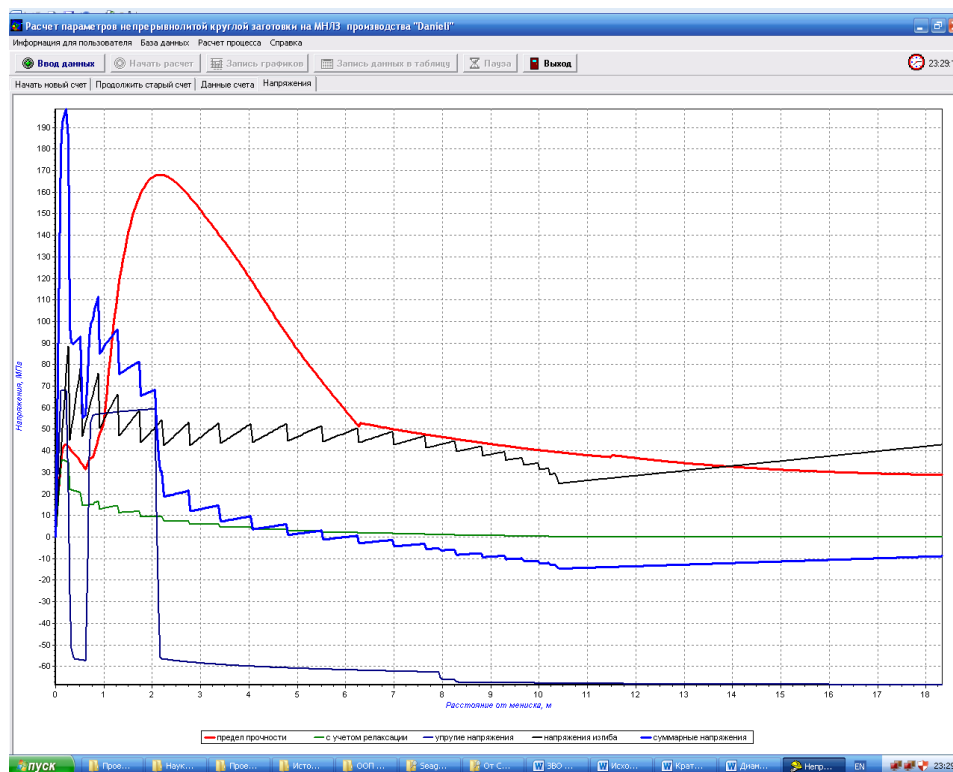


Рис. 7. Графики распределения напряжений с учетом эффектов релаксации материала заготовки, наращивания твердой корки заготовки и фазовых превращений; суммарных напряжений и предела прочности по длине заготовки для условий разливки круглой заготовки диаметром $\varnothing 150$ мм при скоростях литья от 2,2 м/мин для 3,4 м/мин.

2. Для исследования напряженного состояния круглой стальной заготовки при ее формировании в кристаллизаторе и дальнейшем прохождении вдоль всей технологической линии радиальной МНЛЗ проведено численное моделирование температурных полей и напряженного состояния непрерывнолитой заготовки в расчетной программе TERM при помощи трехмерной пространственной модели.

3. Результаты проекта опробованы и применяются в виде конкурентоспособной компьютерной методики прогнозирования дефектов геометрической формы и оценки качества непрерывнолитых круглых заготовок в условиях разливки на действующих сортовых МНЛЗ производства «Danieli». Результаты расчетов позволяют дополнять базу данных прогнозно-статистического характера, которой руководствуется персонал при принятии решений в вопросе оценки напряженного состояния круглой сортовой заготовки с целью предотвращения возникновения трещин.

4. Предполагается патентно-лицензионная и коммерческая проработка вопросов использования разработок, а также внедрение разработанных методик в учебном процессе вузов металлургического профиля [10] при подготовке инженеров-металлургов и теплотехников в качестве расчетных и учебных компьютерных программ для практических занятий, курсового и дипломного проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Optimization continuous casting rounds technology on the billet CCM / A. A. Minayev, A. N. Smirnov, I. P. Kovalenko, E. N. Smirnov // Metal 2002 : 11-th Int. Metallurgical & Materials Conference, 14-16 May, 2002, Ostrava (Czech Republic). – Ostrava, 2002. – 14.–16.5. – P. 84-111.
2. Гридин С. В. Особенности формирования непрерывнолитой заготовки круглого сечения / С. В. Гридин, И. П. Коваленко // Прогрессивные технологии непрерывной разливки стали: XXI век : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., г. Донецк, 28-30 мая 2002. – С. 41-42.
3. Modern Combine Methods for Estimation Critical Bending and Unbending Parameters CCM / A. Smirnov, D. P. Kykuy, S. V. Gridin, A. Yu. Tsuprun // Metal 2003 : 12-th Int. Metallurgical & Materials Conference, 20-22 May 2003, Ostrava (Czech Republic). – Ostrava, 2003. – 20.–22.5. – P. 215-223.
4. Недопекин Ф. В. Анализ напряженно-деформированного состояния слитков с помощью экспертной системы «Дефект» / Ф. В. Недопекин, В. В. Белоусов, С. В. Гридин // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1995. – № 7. – С. 57-59.
5. Белоусов В. В. Расчет термических напряжений при непрерывной разливке стали / В. В. Белоусов, С. В. Гридин, Ф. В. Недопекин // Промышленная теплотехника. – 1995. – 17, № 4. – С. 99-104.
6. Гридин С. В. Исследование усадочных явлений при формировании слябовой заготовки в зоне кристаллизатора / С. В. Гридин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – № 8. – С. 176- 180.
7. Минимизация термических напряжений в непрерывном слитке с ограничением на объем жидкой лунки / Ф. В. Недопекин, В. К. Толстых, Н. А. Володин [и др.] // Промышленная теплотехника. Секция: Теплообмен в технологических процессах (теплотехнология). – 1997. – Т. 19, № 6. – С. 53-57.
8. Математическое моделирование процессов загиба и разгиба непрерывнолитой заготовки / А. Н. Смирнов, С. В. Гридин, Ю. Н. Белобров [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – № 4 (18). – С. 8-13.
9. Разработка параметров затвердевания и конструкции кристаллизаторов для круглых непрерывнолитых слитков из меди / А. Н. Смирнов, С. В. Гридин, Ю. Д. Савенков, Д. В. Спиридонов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 6. – С. 72-75.
10. Захаров Н. И. Математические модели и методы численного моделирования теплофизических процессов : учеб. пособие / Н. И. Захаров, С. В. Гридин. – Донецк : Цифровая тип., 2017. – 120 с.

Поступила в редакцию 01.03.2019 г.

INFLUENCE OF THE SPEED MODE OF CONTINUOUS CASTING ON CHANGE OF THE STRESSED-DEFORMED STATE OF THE ROUND PURPOSES

S. Gridin

Numeral research of influence of the speed mode of the continuous casting of round ingot is in-process executed on their tensely-deformed state in the period of casting. The speed mode renders substantial influence on formation of defects in a continuously cast ingot. Nascent stresses can cause appearance of cracks and remaining deformations that worsen quality of the prepared products.

Keywords: continuous casting; round ingot; mold; technology casting speed; yield poin; depth of liquid phase; thickness of hard shell; stress; strain, deformation, computer simulation.

Гридин Сергей Васильевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: gridin_@mail.ru

Gridin Sergey

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

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 504.05:628.34

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕАГЕНТНОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ТВЕРДЫХ ПРИМЕСЕЙ

© 2019 А.П. Симоненко, А.Ю. Собко, И.А. Артемова

Настоящая статья содержит результаты многолетних исследований, выполненных в Донецком национальном университете, по очистке сточных вод предприятий угольной промышленности и навозных стоков крупных свиноводческих комплексов. Показаны преимущества применения модифицированного полиакриламида (МПАА), смеси коагулянтов и флокулянтов для очистки сточных вод от твердых примесей и уплотнения образовавшегося осадка. Особое внимание в статье уделено созданию мобильной установки для реагентной очистки шахтных вод и сточных вод свиноводческих комплексов с различной степенью загрязнённости

Ключевые слова: сточные воды, угольные шахты, свиноводческие комплексы, твердые примеси, коагулянты, флокулянты, мобильная установка.

Основы реагентной очистки сточных вод. Действие *коагулянтов* основано на образовании сверхмицеллярных коллоидных структур [1]. В результате многостадийного гидролиза коагулянта образуются многоядерные заряженные комплексы гидратированных гидроксидов. Образование хлопьев при введении в воду минеральных коагулянтов следует рассматривать как совместную коагуляцию гидроксидов алюминия и железа с находящимися в воде коллоидными частицами: минеральными (глинистые минералы, кварц) и органическими (гумусовые и дубильные вещества). Эти частицы в большинстве случаев отрицательно заряжены, а частицы гидратированных гидроксидов алюминия и железа несут положительный заряд. Следовательно, в основе образования хлопьев лежит взаимодействие разноименных заряженных коллоидных частиц — процесс, наиболее энергетически вероятный.

С точки зрения влияния структурных особенностей $Al(OH)_3$ и $Fe(OH)_3$ на степень очистки воды коагулянтами наиболее важны такие свойства коагуляционных структур как площадь их поверхности, гидратация, степень подверженности старению и пептизации, тиксотропная обратимость, прочность и адсорбционная способность.

Действие *флокулянтов* основано на адсорбции активных звеньев макромолекул полимера на поверхности дисперсных частиц. Структура макромолекул является одним из важнейших факторов, определяющих эффективность флокуляции. Для флокулянтов характерна цепочечная структура макромолекул, линейная или разветвленная. Молекулы флокулянтов обладают достаточной гибкостью и находятся в воде обычно в свернутом состоянии, в виде молекулярных клубков. В зависимости от химической структуры полимера, его молекулярной массы, наличия в цепочке тех или иных полярных групп, содержания в воде низковалентных катионов и анионов, а также от расстояния между отдельными макромолекулами и их взаимной ориентации макромолекулы могут иметь различные размеры и форму (конформацию).

Несомненное влияние на процесс флокуляции должен оказывать размер макромолекул (молекулярная масса полимера): чем больше размер макромолекул, тем относительно больший процент сегментов адсорбированных макромолекул остается свободным и способным к адсорбции на других частицах. Большая макромолекула может связать большее число твердых частиц, образуя таким образом более крупные флокулы.

Вместе с тем по мере возрастания размеров макромолекул усиливаются стерические явления и затрудняется подход частиц с адсорбированными макромолекулами к свободной поверхности других частиц.

Совместное действие обоих факторов приводит к тому, что наиболее эффективная флокуляция и максимальный размер флокул должны наблюдаться при определенном соотношении между размером коллоидных частиц и макромолекул полимера.

В теории флокуляции наиболее часто рассматриваются два механизма формирования флокул: за счет образования полимерных мостиков между дисперсными частицами и нейтрализация заряда поверхности частиц в результате адсорбции противоположно заряженных полиэлектролитов [2-5].

Механизм мостикообразования, предложенный Ла Мером с сотрудниками, позволяет объяснить многие закономерности флокуляции, полученные на практике. Необходимым условием данного механизма является то, что эффективный размер макромолекул в растворе должен превышать радиус сил отталкивания между дисперсными частицами. Очевидно, что это возможно при использовании полимеров с линейной структурой макромолекул и высокой молекулярной массой.

В большинстве технологических процессов флокуляция протекает быстро (в течении нескольких минут) и адсорбционное равновесие не успевает установиться. Это является причиной тому, что одновременно адсорбируется только часть сегментов каждой макромолекулы, а остальные сегменты находятся в растворе в свободном состоянии. Количество адсорбированных сегментов по опытным данным в данном случае составляет 30-35% [1]. На эффективность флокуляции существенное влияние оказывает также соотношение площадей свободной поверхности частиц и поверхности, занятой макромолекулами. Наиболее эффективная флокуляция наблюдается, когда соотношение этих площадей равно 0,5, т.е. при “половинном” покрытии поверхности частиц от предельно возможного [1, 3, 4].

Флокулирующее действие полимеров усиливается при добавлении в очищаемую жидкость низкомолекулярных электролитов. При этом образуются сложные комплексы “частица - ион макромолекулы — многозарядный ион — ион макромолекулы — частица”.

Второй механизм флокуляции — нейтрализация поверхностного заряда частиц адсорбированными макромолекулами - возможен при значительном накоплении в адсорбционном слое противоположно заряженных звеньев полимера. Этот механизм аналогичен коагуляции лиофобных систем. Число контактов макромолекулы с поверхностью взвешенной частицы велико, при этом макромолекула разворачивается с образованием “мозаичной структуры” [3].

Флокуляция по данному механизму должна происходить в узкой области концентраций полимера, обеспечивающей нейтрализацию заряда поверхности. За пределами этой области частицы несут достаточный заряд для сохранения устойчивости.

Модифицированный полиакриламид (МПАА). Для исследования механизма флокуляции высокомолекулярными полимерами дисперсных частиц в работе [5] был

получен модифицированный флокулянт на основе полиакриламида, который синтезируется из технического полиакриламида путем полимераналогичных преобразований. При этом получаемый флокулянт проявляет ярко выраженные катионные свойства (за счет модификации амидных групп), имеет слаборазветвленную структуру макромолекул, характеризуется высокой молекулярной массой, величина которой лежит в интервале $(2-4) \cdot 10^6$. Основные физико-химические свойства МПАА приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические свойства модифицированного полиакриламида

№	Наименование контролируемого параметра	Ед. изм	Величина определяемого параметра	Примечания
1.	Полимерсодержание	вес. %	(2,0 – 2,2)	Водный раствор
2.	Характеристическая вязкость	дл/г	(3,5 – 5)	В 10%-ном р-ре NaCl
3.	Плотность (при 25 ⁰ С)	г/см ³	(1,08 – 1,1)	
4.	Полнота растворения при перемешивании в воде: – на 20 сек – на 100 сек	вес. %	(80 – 85) (90 – 95)	
5.	Водородный показатель	ед	(2,5 – 4)	Вызывает коррозию черных и цветных металлов
6.	Рекомендуемая рабочая концентрация	вес. %	(0,01 – 0,02)	
7.	Время перемешивания со стоком	сек.	(20 – 40)	
8.	Интенсивность перемешивания	с ⁻¹	(200 – 350)	G – средний квадратичный градиент скорости
9.	Оптимальная доза	г/кг загрязне-ния	25 – 30	
10.	Срок хранения	мес.	Не более 5	
11.	ПДК	мг/л	2	При условии отсутствия в растворе МПАА свободных формальдегида и вторичных аминов.

Важную роль в процессе очистки также играют технические характеристики оборудования, используемого для обработки сточных вод. Главной из таких характеристик является интенсивность перемешивания флокулянта со стоком, которая характеризуется среднеквадратичным градиентом скорости G .

Обычно величину G определяют по формуле:

$$G = \sqrt{E / \eta V \tau} . \quad (1)$$

где E – работа, затрачиваемая на перемешивание; η – вязкость загрязненной воды; V – объем перемешиваемого стока; τ – время полного перемешивания.

Очистка загрязненных шахтных вод [6, 11]. Горнодобывающие предприятия угольной промышленности откачивают большой объем шахтных вод. Так, например, только в Донбассе ежегодно на поверхность подается около 800 млн. м³ воды, загрязненной взвешенными веществами, бактериальными примесями и минеральными солями. Сброс такого количества шахтных вод в наземную гидрографическую сеть вызывает сильное заиление, засоление и закисление водоемов, водотоков, дестабилизируя тем самым экологическое равновесие в регионе. Постоянный переход

горных работ на более глубокие горизонты и усложнение при этом гидрогеологических условий приводят к дальнейшему увеличению объемов и загрязненности забираемых вод различными веществами. Кроме этого, происходит истощение подземных водоносных горизонтов, в том числе насыщенных чистой питьевой водой.

Одним из наиболее перспективных методов очистки шахтных вод, допускающих его реализацию непосредственно в шахте, является реагентный метод, который основан на применении коагулянтов, высокомолекулярных флокулянтов и их смесей. В настоящей работе с целью выбора наиболее активных реагентов были апробированы: коагулянт - сернокислый алюминий и флокулянты - полиакриламид с молекулярной массой $M = (2,2-4,6) \cdot 10^6$, полиэтиленоксид с молекулярной массой $(2,6-4,8) \cdot 10^6$ и модифицированный полиакриламид - МПАА. МПАА получали из обычного технического полиакриламида путем полимераналогичных преобразований. Сущность этого способа заключается в обработке однородного (1-2) %-ного раствора полиакриламида формальдегидом и диметиламином при определенных условиях. При этом получается флокулянт в виде (2-4) %-ного водного раствора, который обладает ярко выраженными катионными свойствами и имеет большую молекулярную массу $(2-4) \cdot 10^6$, сохраняет свои свойства при хранении в течении 4-6 месяцев.

В процессе исследований использовались маточные водные растворы индивидуальных компонентов и их смеси с различным весовым отношением. На первом этапе в качестве объекта исследования использовалась шахтная вода с загрязненностью 185 мг/л. Степень очистки загрязненных вод определялась с помощью фотоэлектрокалориметра КФК -4. Результаты эксперимента приведены в табл. 2.

Анализ результатов исследований показывает, что в чистом виде ПАА и ПЭО являются малоэффективными флокулянтами для очистки шахтных вод. Сернокислый алюминий эффективно образует хлопья из тонкодисперсных загрязнений и тем самым хорошо очищает шахтную воду. Однако, эти хлопья не обладают достаточной прочностью. Даже при незначительном перемешивании шахтной воды, обработанной коагулянтом, хлопья легко разрушаются и мутность воды резко возрастает.

Более высокую очистку шахтных вод от твердых примесей можно получить путем последовательного ввода сернокислого алюминия и полиакриламида. При этом ПАА вводят спустя (60-90) секунд после ввода сернокислого алюминия. Совместное воздействие коагулянта и ПАА заметно увеличивает, уплотняет и упрочняет образующиеся флокулы.

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований по очистке шахтной воды, сернокислым алюминием (СА) ПАА, ПЭО, МПАА и смесью СА+ПАА

№ п/п	Реагент	Доза, мг/л	Время реакции, сек.	Размер образуемых флокул, мм	Степень очистки, %
1	Сернокислый алюминий	50-150	60-90	0,5-1,0	70-80
2	Полиакриламид	5-15	30-40	До 0,5	5
3	Полиэтиленоксид	5-15	40-50	До 1,0	15
4	Модифицированный полиакриламид	5-30	35-50		60-70
5	Сернокислый алюминий + ПАА	(50-150)(5-8)	(50-90)(20-30)	0,5-2,0	75-85

Были также проведены исследования по влиянию модифицированного полиакриламида на очистку шахтных вод. При обработке этим флокулянтom загрязненной шахтной воды образуются наиболее крупные (до 2,5 мм в диаметре) и плотные флокулы. Однако степень очистки за равные промежутки времени несколько ниже, чем при совместном использовании сернокислого алюминия и полиакриламида.

Дальнейшие исследования были направлены на выбор наиболее эффективных составов реагентов для очистки шахтных вод с различной степенью загрязненности. В качестве объекта исследований были выбраны пробы шахтных вод ш/у им. А.Ф. Засядько и им. М. Горького ГП "Донецкуголь", содержащие 40,0; 185,0; 210,0; 400,0 и 535 мг/л взвешенных веществ. Данные экспериментальных исследований приведены в табл. 3.

Таблица 3. Содержание взвешенных веществ в шахтных водах после двухчасового отстаивания при применении различных химических реагентов

№п/п	Наименование реагента	Доза, мг/г	Содержание взвеси в исходной шахтной воде, мг/л				
			C ⁰ =40	C ⁰ =185	C ⁰ =210	C ⁰ =400	C ⁰ =535
КОАГУЛЯНТЫ							
1	Сернокислый алюминий	100	8	39	19	30	42
2	Хлорное железо	100	2	14	6	14	25
3	Сернокислое железо	100	3	20	30	20	30
ФЛОКУЛЯНТЫ							
4	Полиакриламид	1,5	12	29	94	44	28
5	Полиэтиленоксид	1,5	22	64	100	63	60
6	МПАА	1,5	10	24	13	16	23
СМЕСЬ «КОАГУЛЯНТ+ФЛОКУЛЯНТ»							
7	Сернокислый алюминий + полиакриламид	100+1,0	18	31	13	27	30
8	Сернокислый алюминий + полиэтиленоксид	100+1,0	24	29	16	28	38
9	Сернокислый алюминий +МПАА	100+1,0	9	19	4	10	20

Из табл. 3 видно, что во всем диапазоне исследованных концентраций для очистки шахтных вод наиболее эффективными являются: из коагулянтов - хлорное железо, из флокулянтов - модифицированный полиакриламид (МПАА), из смеси "коагулянт + флокулянт" - смесь сернокислого алюминия и модифицированного полиакриламида. При этом также установлено, что для уплотнения осадков, полученных за счет введения коагулянтов, целесообразно использовать МПАА, который значительно эффективнее ПЭО и ПАА.

Совместное применение процесса флокуляции, гирлянд из волосяных ершей [12] и аэрации позволит эффективнее очищать сточные воды. Предполагается, что за счет применения флокулянтов загрязняющие частицы укрупнятся, и, следовательно, будут эффективнее задерживаться волосами ершей. Барботажный эффект, осуществляемый аэрационными трубами, будет препятствовать оседанию

образовавшихся флоккул на дно канала. Все это позволит уменьшить длину очистного канала и сократить время очистки.

Очистка навозных стоков животноводческих комплексов [8, 13-18]. На ряду с созданием нормального микроклимата в животноводческих помещениях и защитой атмосферного воздуха от загрязнений к экологическим проблемам крупных животноводческих комплексов следует отнести очистку навозных стоков от твердых примесей. Обычно на таких объектах удаление навоза производят гидросмывом, т. к. в отличие от других известных способов он отличается простотой, пониженной трудоемкостью, эффективен в санитарном отношении. Однако, в процессе гидросмыва образуется очень большое количество высококонцентрированных, трудноокисляемых, биологически активных стоков. На животноводческом комплексе при выращивании 108 тыс. свиней в год образуется свыше 1 млн. м³ навозных стоков, которые представляют значительную угрозу окружающей среде. Такие стоки имеют слабощелочную или нейтральную реакцию, являются сложными дисперсными системами, их прозрачность близка к нулю, содержание взвешенных веществ лежит в пределах (6-15) г/л, биологическое потребление кислорода (БПК₅) может достигать 24 г О₂/л.

В качестве примера в табл. 4 приведен фракционный состав (в вес. %) твердых включений свиного навоза, образующегося при кормлении свиней кормами заводского производства и приготовленными непосредственно в хозяйстве.

Из приведенных данных видно, что в навозе содержится очень большое количество частиц с размерами до 1,0 мм. Так при кормлении свиней кормами заводского производства их содержание в среднем равно 63%. В случае, когда животные питаются кормами, приготовленными непосредственно в хозяйстве, содержание частиц такой фракции меньше 42%. Следует также отметить, что в обоих случаях навозные стоки образуют седиментационно и агрегативно устойчивые дисперсии.

Таблица 4. Фракционный состав твердых включений свиного навоза

№п/п	Размер частиц, мм	Содержание частиц в навозном стоке (вес.%) при кормлении свиней кормами	
		Заводского производства	Приготовленными в хозяйстве
1	0,05 – 0,1	14,9	8,0
2	0,1 – 0,5	25,0	19,8
3	0,5 – 1,0	23,3	14,5
4	1,0 – 2,0	17,8	29,8
5	2,0 – 5,0	12,0	21,4
6	Больше 5,0	7,0	6,5

Очистку таких сточных вод от взвешенных частиц можно проводить с применением специальных химических веществ (реагентов) – коагулянтов и флокулянтов, т.к. их действие связано с изменением агрегативной устойчивости стоков и образованием из грубодисперсных и коллоидных загрязнений крупных (с повышенной плотностью) быстрооседающих хлопьев и флоккул.

В связи со строительством крупных животноводческих комплексов возникает и приобретает все большую остроту проблема уборки и утилизации жидкого навоза, объемы которого из года в год возрастают. При этом следует заметить, что такой навоз имеет влажность до 98%.

Механическую очистку жидкого навоза рекомендуется осуществлять на дуговых

ситах и в вертикальных отстойниках. Осадок с дугowych сит и отстойников обезвоживают в специальных бункерах-обезвоживателях и в центрифугах. При этом осадок обеззараживают в буртах, а осветленный сток – в пароструйных аппаратах. Однако, как показывает практика, для реализации такой схемы очистки необходимо создавать специальные инженерные сооружения с последующим оснащением их громоздким и энергоемким оборудованием. Кроме этого, использование этой схемы обработки и утилизации отходов животноводства не обеспечивает очистку жидкой фракции до уровня, позволяющего сбрасывать ее в открытые водоемы или для орошения сельскохозяйственных культур на ограниченных площадях. Такой подход к решению проблемы особенно актуален для регионов с дефицитом использования чистой воды для разбавления навозных стоков, а также высокой стоимостью гидротехнического строительства.

В связи с вышеизложенным, в настоящее время во всех ведущих странах мира проводятся исследования по интенсификации процессов очистки навозных стоков с применением коагулянтов, флокулянтов и их смесей. Введение таких химических соединений в очищаемые жидкости приводит к изменению их агрегативной устойчивости и образованию из грубодисперсных и коллоидных загрязнений крупных, с повышенной плотностью флокул.

В последние годы в процессах очистки промышленных стоков от твердых примесей широкое применение получили флокулянты. При этом наиболее перспективными являются катионактивные флокулянты – водорастворимые полимеры с большой молекулярной массой. Многочисленными исследованиями показано, что катионактивные флокулянты наиболее эффективны при очистке сточных вод, содержащих взвешенные органические примеси, имеющие отрицательный заряд.

Синтез катионактивных флокулянтов в промышленных масштабах связан с большими материальными затратами и для его реализации необходимо иметь соответствующую сырьевую базу. Считается целесообразным получать флокулянты, обладающие катионактивными свойствами, в виде водных растворов из сравнительно дешевых и распространенных полимеров, например, полиакриламида.

В работе [14] приведены результаты исследований по созданию основ технологии и необходимого для ее реализации комплекта оборудования для очистки сточных вод от органических загрязнений с применением модифицированного полиакриламида (МПАА). Однако, наряду с перечисленными ранее преимуществами, получаемый МПАА имеет ряд недостатков. Так, например, получить МПАА можно только в виде (2,0-2,2)%-ных (по активному веществу) водных растворов, водородный показатель которых лежит в пределах $pH=(2,5 - 4)$. При этом следует отметить, что срок хранения такого флокулянта не превышает 5 месяцев.

В связи с этим предлагаемая технология предполагает приготовление МПАА непосредственно на месте его применения. С целью исключения коррозии оборудование, емкости для хранения флокулянта, смесители и трубопроводы, по которым он подается, должны быть изготовлены из нержавеющей стали или их внутренняя поверхность должна быть защищена кислотоупорными покрытиями.

В работе [14] стояла задача расширить границы применения катионактивного МПАА для очистки навозных стоков крупных свиноводческих комплексов, создать основы технологии его приготовления из выпускаемого в отечественной промышленности технического полиакриламида.

Оценка эффективности МПАА, как флокулянта, проводилась в два этапа с использованием стоков свиноводческого комплекса совхоза-комбината «Углегорский»

. На первом этапе в исходных стоках и в фильтрате, после обработки флокулянтном и фильтрования через сетку №11, определяли содержание взвешенных веществ, а также прозрачность фильтрата. Кроме этого, были определены коэффициент задержания взвешенных частиц при прохождении через сетку и влажность образующегося осадка. Данные по флокулирующей способности МПАА приведены в табл. 5.

Из приведенных в таблице данных видно, что обработка стока флокулянтном существенно улучшает процесс очистки. Так, например, после обработки стока флокулянтном (при концентрации МПАА 30 г на 1 кг загрязняющих веществ) и фильтрования через сетку № 11 содержание взвешенных веществ уменьшается с 13000 мг/л до 150 мг/л. При этом коэффициент задержания взвешенных частиц увеличивается с 13 % до 98,5 %. Улучшается также такой показатель как влажность образующегося осадка, т.к. в исходном стоке она была равна 98,5 %, а после обработки флокулянтном уменьшилась до 75 % .

Таблицы 5. Данные экспериментальных исследований по очистке навозных стоков МПАА

№ п/п	Основные характеристики		Экспериментальные данные
	1.	Влажность осадка, %	
2.	Взвешенные вещества, мг/л	В исходном стоке	13000
		В фильтрате после обработки флокулянтном и фильтрования	150
3.	Коэффициент задержания взвешенных частиц, %	В исходном стоке	13
		После обработки флокулянтном и фильтрования	98,5
4.	Прозрачность фильтрата, %	В исходном стоке	0
		После обработки флокулянтном	35

На втором этапе были проведены исследования по определению кинетики седиментации твердых частиц в стоках свиноводческого комплекса до и после обработки флокулянтном, с дозой 30 г МПАА на 1 кг загрязняющих веществ. Результаты экспериментальных данных приведены на рис. 1.

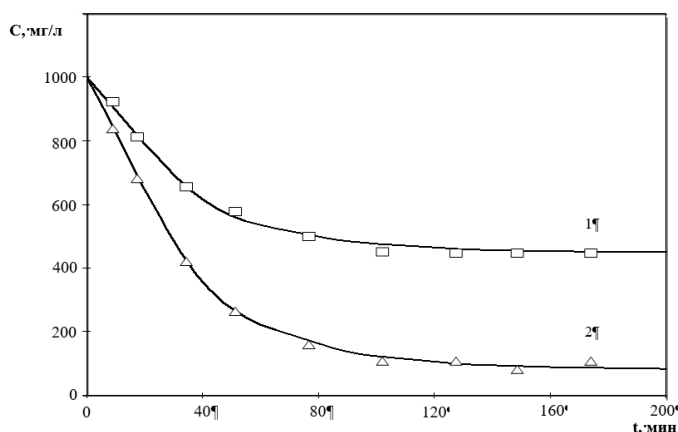


Рис. 1. Кинетика осаждения твёрдых частиц в стоке свиноводческого комплекса до (кривая 1) и после обработки (кривая 2) с дозой 30 г МПАА на 1 кг загрязняющих веществ

Из приведенных на рис. 1 зависимостей видно, что при отстаивании в течении трех часов в исходном стоке содержание взвешенных частиц уменьшается с 1000 мг/л до 500 мг/л. В тоже время обработка навозного стока флокулянта, при таком же времени выдержки, уменьшает концентрацию взвешенных частиц до 80 мг/л. Это позволяет значительно улучшить работу существующих очистных сооружений, а также создать новое, более совершенное оборудование для очистки навозных стоков.

Мобильная установка для очистки сточных вод [8, 19]. С учетом результатов проведенных исследований была разработана, изготовлена и в промышленных условиях испытана мобильная установка для реагентной очистки сточных вод, принципиальная схема которой приведена на рис. 2. В состав установки входят: емкость-накопитель загрязненной воды – 1; центробежный насос – 2; задвижка – 3; манометр – 4; расходомер – 5; устройство забора концентрированных растворов флокулянта (пеносмеситель ПС-1) – 6; (6.1. – трубки заборные с пробковыми кранами); емкость с концентрированным раствором флокулянта – 7; проточная кассета-контейнер с флокулянтам – 8; смеситель типа «шашлык» – 9; отстойник-осветлитель – 10; входной патрубок – 11; турбулизирующие сетки – 12; сетки-отбойники – 13; патрубок отвода осадка – 14; наклонный тонкослойный отстойник – 15; желоб и патрубок отвода очищенной воды – 16.

Кассета-контейнер (8) применяется для случая использования в качестве флокулянта 8 %-го гелеобразного полиакриламида.

При этом следует отметить, что фрагмент установки, включающий составные элементы (2-9), может использоваться как вспомогательное оборудование для обработки флокулянтами загрязненных стоков, с последующей их очисткой и уплотнением осадка на ленточных фильтр – прессах типа ЛМН – 10, ЛМН – 15 и др.

Одним из основных узлов установки является узел подачи и дозирования концентрированного раствора флокулянта (МПАА), в состав которого входят: пеносмеситель ПС-1, три заборные трубки с пробковыми кранами и калиброванными шайбами, емкость для концентрированного раствора флокулянта. Проверка работоспособности этого узла показала, что он обеспечивает ввод в очищаемую воду необходимого количества флокулянта (концентрированного водного раствора МПАА).

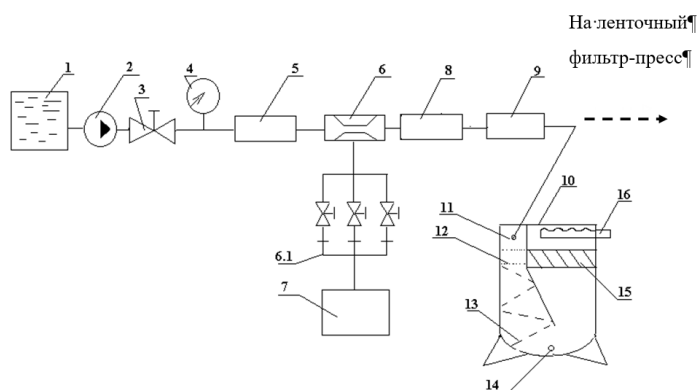


Рис. 2. Принципиальная схема установки для очистки шахтных вод

1. Емкость для воды; 2. Насос; 3. Задвижка; 4. Манометр; 5. Расходомер; 6. Пеносмеситель ПС-1; 6.1. Трубки заборные с кранами; 7. Емкость с раствором флокулянта; 8. Кассета-контейнер с флокулянтам; 9. Смеситель типа "шашлык"; 10. Отстойник-осветлитель; 11. Входной патрубок; 12. Турбулизирующие сетки; 13. Сетки-отбойники; 14. Патрубок отвода шлама; 15. Наклонный тонкослойный отстойник; 16. Желоб и патрубок отвода осветленной воды.

Примечание. При обработке шахтной воды концентрированным раствором МПАА из емкости 7 кассета – контейнер 8 не используется)

При этом следует отметить, что расход маточного раствора может быть изменен за счет установки на всасывающем патрубке калибровочной шайбы другого диаметра или одновременного открытия 2-х или 3-х пробковых кранов.

Обработку загрязненной воды высокомолекулярным флокулянтom можно также проводить с использованием проточных кассет с твердым водорастворимым брикетом (при использовании ПЭО) или кассет-контейнеров с гелеобразным ПАА.

В качестве примера в табл. 6 приведены результаты приготовления растворов для обработки загрязненной воды флокулянтom, которые были получены с использованием одной кассеты, оснащенной контейнером с ПАА в виде 6,3 %-го геля. Расход воды через кассету составлял 6 м³/час, температура – 20 °С.

Таблица 6. Зависимость концентрации ПАА во времени в намываемом растворе

τ, мин	4	10	23	31	38	42	47	60
C _{ПАА} , ppm	2,4	2,4	2,2	2,6	2,0	2,2	1,9	1,9

Из табл. 6 видно, что на протяжении 60 минут, за счет размыва геля, приготавливались (0,0019÷0,0026)%-е растворы полиакриламида. Такого количества ПАА вполне достаточно для очистки промышленных стоков от загрязнений неорганической природы и уплотнения образующегося при этом осадка. Узел обработки очищаемых сточных вод флокулянтom может представлять собой две или даже три последовательно или параллельно подсоединенных кассет-контейнеров. Это позволяет: либо повысить концентрацию флокулянта в очищаемой воде при неизменном расходе, либо увеличить объем очищаемой воды при постоянной концентрации флокулянта.

Для эффективного смешивания реагентов с загрязненной водой можно использовать смесители самых различных конструкций. Однако, как показали результаты испытаний, достаточно эффективным, простым в изготовлении и эффективным в использовании является смеситель типа «шашлык», который представляет собой стержень с закрепленными (через определенные расстояния) пластинами. Течение очищаемых жидкостей через такой смеситель обеспечивают равномерное распределение флокулянта по всему объему при максимальном сохранении его молекулярной массы.

Камера, в которой происходит окончательное перемешивание, образование флокул и отделение образующегося осадка, представляет собой емкость, разделенную перегородками на три зоны и оснащенную турбулизирующими сетками (12), сетками отбойниками (13), патрубком отвода шлама (14), тонкослойным наклонным отстойником (15), желобом и патрубком отвода осветленной воды (16) (рис. 2).

Основные требования к конструкции такой камеры – малые скорости потоков (для исключения выноса загрязнений из зоны осветления) и большие времена нахождения обработанной загрязненной воды в камерах хлопьеобразования и отделения осадка. В табл. 7 приведены обобщающие данные для установки, применяемой для очистки шахтных вод: скорости потоков (V , см/с) и времена нахождения (τ , с) обработанной реагентами загрязненной воды в различных рабочих зонах осветления; через S и L обозначены площадь поперечного сечения потока и длина рабочей зоны соответственно. Эксперименты проводились для двух режимов работы установки, когда расход Q очищаемой воды равен 0,15 и 0,3 л/с.

Таблица 7. Технические характеристики рабочей камеры водоочистной установки

№ п/п	Рабочая зона	S, см ²	L, см	V, см/с / τ, с	
				Q ₁ = 0,15 л/с	Q ₂ = 0,3 л/с
1.	Дополнительного перемешивания флокулянта	1500	20	0,1 / 200	0,2 / 100
2.	Образования хлопьев и флокул	2000	60	0,08 / 750	0,16 / 375
3.	Отделения осадка	3750	60	0,045 / 1330	0,09 / 667

Из приведенных в табл. 7 данных видно, что скорости движения очищаемых жидкостей во всех трех зонах малы. Так, например, в зоне образования хлопьев и флокул, при расходе воды через установку 0,15 л/с, скорость очищаемой жидкости равна 0,08 см/с. В таком режиме течения обработанная реагентом загрязненная вода будет находиться около 750 секунд. В зоне отделения осадка эти показатели соответственно равны 0,045 см/с и 1330 секунд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артемова И. А. Перспективы обеспечения экологической безопасности объектов строительства и городского хозяйства путем применения гидродинамически активных полимерных композиций / И. А. Артемова, А. П. Симоненко // Системы обеспечения техносферной безопасности: материалы V Всерос. науч. конф. и шк. для молодых ученых (с Междунар. участием), г. Таганрог; Ростов-на-Дону, 5-6 окт. 2018 г. – Таганрог, 2018, - С. 233-234.
2. Баран А. А. Флокулянты в биотехнологии / А. А. Баран, А. Я. Тесленко. – Ленинград: Химия, 1990.- 144 с.
3. Вейцер Ю. И. Высокомолекулярные флокулянты в процессах очистки природных и сточных вод / Ю. И. Вейцер, Д. М. Мин. – Москва: Стройздат, 1984. - 202 с.
4. Гладкая И. Н. Снижение гидродинамического сопротивления турбулентного течения и очистка сточных вод, загрязненных механическими примесями / И. Н. Гладкая // Вестник Донецкого национального университета. – 2019. - Вып. 11, Т.1. – С. 61-65.
5. Гидродинамически-активные полимерные композиции в пожаротушении : монография / Ступин А. Б., Симоненко А. П., Асланов П. В., Быковская Н. В. – Донецк: ДонНУ, 2001. – 149 с.
6. Запольский А. К. Коагулянты и флокулянты / А. К. Запольский, А. А. Баран. - Ленинград : Химия, 1987. – 204 с.
7. Мобільний пристрій для високоефективного очищення стічних вод промислових підприємств / О. Ступін, О. Симоненко, П. Асланов та ін. // Сучасні проблеми водопостачання і знешкодження стічних вод : сб. докл. і тез. Українсько-Польської наук.-техн. конф., Львів, 1996. - Львів, 1996. – С. 479-480.
8. Применение катионного флокулянта ОКФ для подготовки осадков городских сточных вод к механическому обезвоживанию / Ю. И. Вейцер, З. А. Колобова, Р. Я. Аграноник и др. // Водоснабжение и санитарная техника. – 1981. - №9. – [б. с.]
9. Проблемы экологии и техногенно-экологической безопасности: монография / под общей ред. Ступина А. Б. – Донецк: ДонНУ, 2010. -503 с.
10. Решение проблем экологии и техногенно-экологической безопасности путем применения гидродинамически активных композиций / А. П. Симоненко, П. В. Асланов, А. Ю. Собко, С. А. Фоменко // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2017. – № 1. – С. 81-102.
11. Симоненко А. П. Использование модифицированного флокулянта для очистки сточных вод и обеззараживания осадка / А. П. Симоненко, А. Ю. Собко // Вісник Донецького національного університету. Серія А : Природничі науки. – Вип.1. – 2000. – С. 164-170.
12. Симоненко А. П. Применение водорастворимых полимерных композиций для улучшения микроклимата на животноводческих комплексах / А. П. Симоненко, А. Ю. Собко // Інженерні системи та техногенна безпека у будівництві. Вісті ДонНАБА. - 2001. - № 2 – С. 48-51.
13. Собко А. Ю. Оптимизация режима перемешивания водных дисперсных систем с флокулянтами / А. Ю. Собко // Вісник Донецького університету. Серія А : Природничі науки. - 2008. - № 2. - С. 487-489.

14. Собко А. Ю. Очистка шахтных вод от взвешенных веществ с помощью коагулянтов и флокулянтов / А. Ю. Собко // Вісник Донецького національного університету. Серія А: Природничі науки. -1998. - №1. - С. 160-163.
15. Собко А. Ю. Флокуляционная очистка навозных стоков крупных свиноводческих комплексов добавками модифицированного полиакриламида / А. Ю. Собко, А. П. Симоненко // Девятая Международная научно-практическая конференция, г. Ростов -на-Дону, 2-4 март. 2016г. - Ростов н/Д, 2016. - С. 522-525.
16. Ступин А. Б. Гидродинамически-активные композиции в энергосбережении и экологии: монография / Симоненко А. П., Асланов П. В. – Донецк: ДонГУ, 1999. – 240 с.
17. Ступин А. Б. Применение гидродинамически-активных полимерных композиций в пожаротушении / А. Б. Ступин, А. П. Симоненко, Н. В. Быковская // Бюлетень пожежної безпеки : науково-технічні проблеми та рішення. – 2001. – № 2 (7). – С. 4-5.
18. Увеличение производительности камер с волосяными ершами и аэрационными трубами для очистки сточных вод / В. В. Дремов, Ф. В. Недопекин, Н. И. Куликов, И. А. Артемова // Вести автомобильнодорожного института. – 2017. – № 2 (21). – С. 57-70.
19. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии / Д. А. Фридрихсберг. –Ленинград : Химия, 1984. - 368 с.

Поступила в редакцию 03.02.2019 г.

PERFECTION OF REAGENT CLEANING TECHNOLOGY FOR SEWAGE WATER FROM SOLID IMPURITIES

A. Simonenko, A. Sobko, I. Artyomova

This article contains the results of years of research carried out at the Donetsk National University on the wastewater treatment of coal industry enterprises and manure from large pig breeding complexes. The advantages of using modified polyacrylamide (МРАА), a mixture of coagulants and flocculants for the treatment of wastewater from solid impurities and compaction of the formed sediment are shown. In the article particular attention is paid to the creation of a mobile unit for the reagent treatment of mine waters and sewage pig breeding complex with varying degrees of contamination

Keywords: wastewater, coal mines, pig-breeding complexes, solid impurities, coagulants, flocculants, mobile installation.

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 of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Собко Александр Юрьевич

Заведующий НИЧ, старший преподаватель кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха; ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: sobko63@gmail.com

Sobko Aleksandr

Head of research and development division, senior Lecturer of the Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh; of 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; of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

УДК 504.45

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ НЕГАТИВНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОДОЕМЫ

© 2019 Т.И. Степаненко, О.А. Вахрушева

В работе исследовано состояние поверхностных водоемов, а также их влияния на экологическую безопасность населения. Проведена оценка риска антропогенного воздействия на поверхностные водоемы, а также оценка не канцерогенного риска здоровью населения от загрязнения поверхностных водоемов. Определены недостатки действующей системы нормирования качества поверхностных вод. Предложены рекомендации по предотвращению негативных последствий антропогенного воздействия на поверхностные водоемы.

Ключевые слова: поверхностные воды, загрязняющие вещества, оценка риска, антропогенное воздействие.

Загрязнение водных объектов представляет большую опасность, так как вода является ценнейшим природным ресурсом, который составляет основу жизни [1].

Защита водных объектов от загрязнения и забота о сохранении биоразнообразия является важнейшей задачей современности. Экологические проблемы особенно остро стоят в индустриальных городах, где плотно застроенные, транспортно-перегруженные и промышленно обустроенные территории, несут огромные техногенные и антропогенные нагрузки [2].

Главными загрязнителями водных объектов в Донецкой Народной Республике являются объекты горной, металлургической и коксохимической промышленности. Со сточными водами в водоемы поступают такие загрязняющие вещества как сульфаты, хлориды, гидрокарбонаты, железо, аммиак, нитриты, нитраты, нефтепродукты и др.

Структура промышленности Донецкой Народной Республики представлена на рисунке 1.

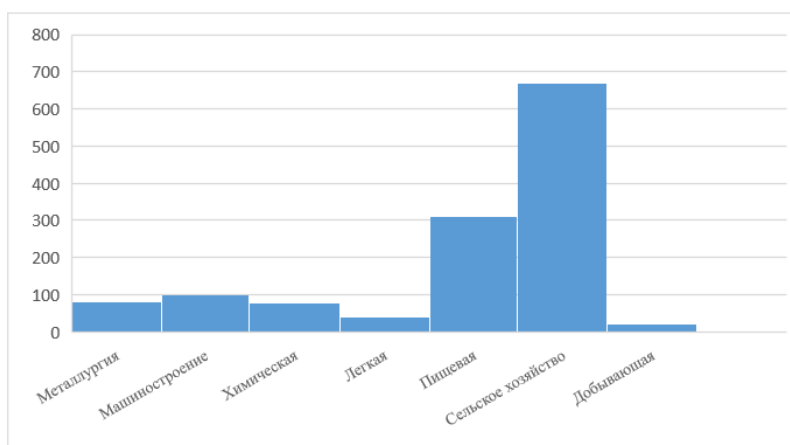


Рис. 1. Структура промышленности Донецкой Народной Республики

Известно, что на территории Донецкой Народной Республики основными водотоками с густой овражно-балочной системой являются реки: Кальмиус, Миус,

Крынка, Грузской Еланчик, верховья рек Лугань, Мокрый и Сухой Еланчик, Водяная, Лозовая, Осикова. Общая протяженность речной сети – 5843,9 км [3].

Водные ресурсы формируются за счет поверхностных вод, шахтных, сточных, карьерных, сбрасываемых предприятиями в гидрографическую сеть водотоков, а также за счет дренирования подземных вод.

На территории Донецкой Народной Республики расположены 799 водных объектов общей площадью водного зеркала 11097,68 га, объемом 525,142 миллионов м³, в том числе 46 водохранилищ, общей площадью водного зеркала 7491,7 га, объемом 464,417 миллионов м³[4].

Главными загрязнителями водных объектов в Донецкой Народной Республике являются объекты горной, металлургической и коксохимической промышленности. Со сточными водами в водоемы поступают такие загрязняющие вещества как сульфаты, хлориды, гидрокарбонаты, железо, аммиак, нитриты, нитраты, нефтепродукты и др.

Оценка качества поверхностных вод Донецкой Народной Республики за 2018 год представлена на рисунке 2.

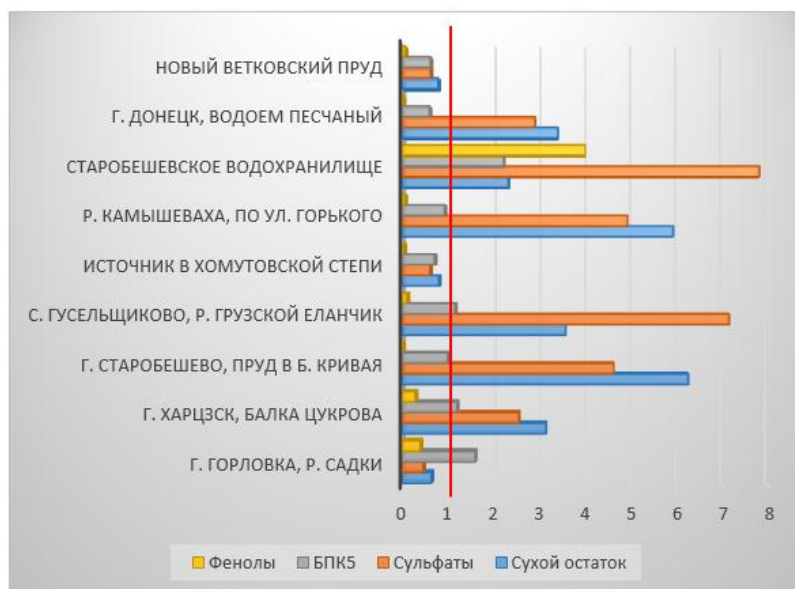


Рис. 2. Оценка качества поверхностных вод Донецкой Народной Республики за 2018 год

В данных приведенных в рисунке 2 представлены худшие показатели качества: водоем Песчаный, Старобешевское водохранилище, р. Камышеваха, р. Грузской Еланчик, пруд в Кривой Балке, балка Цукрова и р. Садки; лучшие показатели имеют: Новый Ветковский пруд и источник в Хомутовской степи.

Качество воды, совместно с ухудшающейся экологической обстановкой, оказывает большое влияние на состояние здоровья населения.

Оценка риска здоровью человека, обусловленная загрязнениями поверхностных вод, является в настоящее время одной из самых важных экологических проблем.

Поскольку при определенной антропогенной нагрузке неблагоприятные последствия воздействия могут возникать без перехода экосистемы в другое неизменное состояние, то оценить риск воздействия возможно только имея точную априорную информацию об антропогенном воздействии. Чем выше вероятность перехода экосистемы из одного состояния в другое, тем выше вероятность проявления неблагоприятных антропогенных изменений.

Для определения негативного воздействия загрязнения поверхностных водоемов проведена оценка риска антропогенного воздействия на водные экосистемы в соответствии действующей методикой [5], а также на здоровье населения.

Расчет проводился по 5 показателем (БПК₅, фенолы, сульфаты, железо, хлориды) в 28 населенных пунктах Донецкой Народной Республики.

Определено, что из общего количества показателей загрязняющих веществ случаев превышения предельно допустимых концентраций - 74. Ингредиенты, превышающие значение 10ПДК – отсутствуют. Доля антропогенного воздействия на водные экосистемы равняется 52,86 %, что соответствует состоянию между кризисным и критическим, которое характеризуется уменьшением видового разнообразия, уменьшением пространственно-временной гетерогенности, увеличением энтропии, упрощением межвидовых отношений и трофической сети, обусловленными значительным антропогенным воздействием.

Проведено определение не канцерогенного индивидуального пожизненного риска для населения Донецкой народной Республики. Для установления количественных характеристик риска оценивалось пероральное воздействие химическими компонентами загрязнения питьевой воды в следствии загрязнения поверхностных водоемов.

Для оценки риска здоровью населения, использована классификация индивидуального пожизненного риска рекомендованная ВОЗ, а также утвержденных методических документов ряда зарубежных стран.

Оценка риска проводилась на основе коэффициента опасности (HQ), представляющего собой соотношение между величиной экспозиции и безопасным уровнем воздействия рассчитывается по формуле 1:

$$HQ = \frac{ADD}{RFD}, \quad (1)$$

где *ADD* – среднесуточная доза поступления вещества, мг/кг×день, рассчитывается по формуле 2:

$$ADD = \frac{C_w \times V \times EF \times ED}{BW \times AT \times 365}, \quad (2)$$

C_w – концентрация вещества в воде, мг/л;

V – величина водопотребления, л/сутки (для взрослого человека 2);

EF – частота воздействия, дней/год; (365)

ED – продолжительность воздействия, лет (принимается 30);

BW – масса тела, кг (принимается 70);

AT – период осреднения экспозиции, лет (принимается 30);

RFD – предельно допустимая концентрация вещества.

В соответствии с классификацией индивидуального пожизненного риска рекомендованная ВОЗ, а также утвержденных методических документов ряда зарубежных стран уровень риска по большинству из веществ соответствует высокому уровню риска, низкий (допустимый) и минимальный (желательный) уровень риска достигается только в отношении фенола. Худшая ситуация в отношении уровня риска отмечается в Старобешевском водохранилище, а также в р. Грузской Еланчик с. Гусельщиково.

При оценке степени загрязненности поверхностных вод Республики использованы следующие нормативные документы:

1. Закон «Об охране окружающей среды» Донецкой Народной Республики [6];

2. Постановление Правительства ДНР №5-13 от 28.03.2019 г. «Об утверждении Порядка разработки и утверждения нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» [7].

В настоящее время нет должного контроля нормативов водопотребления и водоотведения промышленных и хозяйственно-бытовых стоков, что приводит к нарушению существующих правил водопользования и водоотведения.

Законодательство достаточно скупо и декларативно пытается регулировать вопросы, связанные с ксенобиотиками, в то время как именно они определяют опасность для природных экосистем и человека.

Предлагается предпринять следующие шаги для решения проблем обеспечения химической безопасности функционирования водных экосистем:

1. Конкретизация и унификация понятий, мер и полномочий органов государственного управления при обеспечении химической и биологической безопасности природной водной среды, включая донные отложения.

2. В рамках законодательства представляется необходимым упорядочить систему установления и контроля нормативов качества природной водной среды, ликвидировать монополизм ведомств, устанавливающих нормативы качества воды, с целью последующих оценок воздействия источников химической опасности и мер регулирования использования опасных веществ.

3. Организовать государственную систему статистической отчетности по использованию экологически опасных веществ, интегрировав в нее систему отчетности по применению пестицидов и утилизации непригодных или запрещенных к использованию веществ.

В связи со сложившейся экологической ситуацией рекомендуются следующие направления по улучшению состояния водных ресурсов: предотвращение негативных последствий во время закрытия шахт, а также фильтрации вредных веществ в действующие шахты; строительство новых, расширение и реконструкция действующих систем хозяйственно-бытовой канализации; строительство и реконструкция систем очистки и оборотного водоснабжения производственных сточных вод; деминерализация шахтных вод; строительство систем ливневой канализации с очисткой поверхностного стока с территории городов и производственных промышленных площадок; расчистка малых речек и водоемов области, упорядочивание водоохраных зон и прибрежных защитных полос.

С целью охраны и рационального использования водных ресурсов в долгосрочной перспективе необходимо:

- осуществить оценку современного состояния прогнозных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных питьевых вод ДНР с выявлением источников загрязнения;

- осуществить разработку принципиальной схемы водоснабжения ДНР подземными водами и создание конкретных схем водоснабжения отдельных городов и районов;

- осуществить разработку и обеспечить выполнение региональных целевых программ противодействия подтоплению территорий;

- осуществить строительство и реконструкцию существующих очистных сооружений промышленных, хозяйственно-бытовых стоков и канализационных линий;

- обеспечить внедрение в производство передовых мировых маловодных и безводных технологий, систем повторного использования сточных вод;

- осуществить переход на замкнутые системы водоснабжения технологических процессов;
- обеспечить разработку и внедрение новейших технологий по расширению использования минерализованных подземных и шахтных вод на технологические нужды;
- усовершенствовать технологические процессы в производстве и осуществить разработку действенных мер по недопущению аварийных ситуаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: учеб. пособие /Я. П. Молчанова [и др.] ; под ред. Т. В. Гусевой. - Москва: Форум, 2007. - 190 с.
2. Иванов С. В. Влияние качества воды на здоровье населения / Иванов С. В., Федорова Э. Л., Темиров Э. Э. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 3-2. – С. 186-189.
3. О мониторинговых исследованиях качества различных компонентов окружающей среды : отчет Государственного комитета по экологической политике и природным ресурсам при Главе Донецкой Народной Республики [Электронный ресурс] / Федеральная служба по метеорологии и мониторингу окружающей среды (РОСГИДРОМЕТ). – Режим доступа : https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/392500/. – Загл. с экрана.
4. Об охране окружающей среды [Электронный ресурс] : закон Донецкой Народной Республики № 38-ИНС от 30.04.2015, действующая редакция по состоянию на 20.05.2015 г. – Режим доступа : <https://dnrsovet.su/zakon-dnr-ob-ohrane-okr-sredu/>. – Загл. с экрана.
5. Об утверждении Порядка разработки и утверждения нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения [Электронный ресурс] : постановление Правительства ДНР №5-13 от 28.03.2019 г. – Режим доступа: <https://www.systemaeco.ru/news/11-opublikovan-prikaz-minselkhoz-552-ob-utverzhdenii-normativov-kachestva-vody-vodnykh-obektov/>. – Загл. с экрана
6. Оценка риска антропогенного воздействия приоритетных загрязняющих веществ на поверхностные воды суши [Электронный ресурс]: РД 52.24.661-2004 : рекомендации. – Москва : Метеоагентство Росгидромета, 2006. – Режим доступа : <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293834/4293834036.htm>

Поступила в редакцию 27.02.2019 г.

STUDY OF THE POSSIBILITY OF PREVENTION OF NEGATIVE SEQUENCE OF ANTHROPOGENIC EXPOSURE TO SURFACE WATER PANEL

T. Stepanenko, O. Vahrusheva

The work investigated the state of surface water bodies, as well as their impact on the environmental safety of the population. An assessment of the risk of anthropogenic impact on surface water bodies, as well as an assessment of a non-carcinogenic risk to public health from pollution of surface water bodies, has been carried out. The shortcomings of the current system of rationing the quality of surface waters are identified. Recommendations for the prevention of the negative effects of anthropogenic impact on surface water bodies are proposed.

Keywords: surface waters, pollutants, risk assessment, anthropogenic impact.

Степаненко Татьяна Ивановна

ассистент ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: tatyana_stepanenko@list.ru

Stepanenko Tatyana

Assistant Lecturer of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture,
DPR, Donetsk.

Вахрушева Оксана Андреевна

студент ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
ДНР, г. Донецк.

Vahrusheva Oksana

Student of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture,
DPR, Donetsk.

УДК 621.437+620.97

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИЛОВОГО АГРЕГАТА АВТОМОБИЛЯ В ГОРОДСКОМ ЦИКЛЕ

© 2019 С.А. Горожанкин, Н.В. Савенков

В работе исследован потенциал повышения топливной экономичности транспортных средств категорий N_2 и N_3 в условиях ездового цикла по ГОСТ Р 54810-2011 за счет согласования режимов работы двигателя и трансмиссии путем рационального выбора ряда конструктивных и режимных параметров силового агрегата.

Многопараметрическая оптимизация по методу «Хука-Дживса» позволила выявить рациональные режимы управления двигателем и многоступенчатой коробкой передач грузовых автомобилей в зависимости от их полной массы.

В качестве критерия эффективности процесса движения рассмотрены такие показатели, как расход топлива и средняя скорость в рассмотренном ездовом цикле. Результаты получены на примере модельного ряда автомобилей семейства КамАЗ 5511.

Ключевые слова: силовой агрегат, грузовой автомобиль, ездовой цикл, путевой расход топлива, средняя скорость, оптимизация, процесс движения, коробка передач, трансмиссия.

Введение. Эксплуатация автомобилей в городских условиях сопряжена со значительными выбросами ингредиентов продуктов сгорания тепловых двигателей, загрязняющих атмосферу.

Целью данной работы является рациональный выбор режимов работы силового агрегата автомобиля, обеспечивающих минимальный путевой расход топлива. Это позволяет снизить массу выбросов продуктов сгорания топлива и обуславливают возможность повышения экологических качеств автотранспортных средств. Применение роботизированных коробок передач (дискретных многоскоростных редукторов с мехатронным управлением, которые все шире внедряются в последние годы [2]) с комплексными электронными блоками управления силовым агрегатом позволят обеспечить движение в оптимальном режиме (в соответствии с выбранным критерием – например, путевым расходом топлива) при работе по соответствующей программе блока.

Для решения поставленной задачи рассмотрен процесс движения грузовых автомобилей категорий N_2 и N_3 в городском ездовом цикле на дороге в соответствии с ГОСТ Р 54810-2011 [3]. Режим движения автомобиля представлен на рис.1. В соответствии с [3] ездовой цикл представляет собой последовательность участков движения как с постоянными, так и переменными значениями скорости, а также включает ряд остановок продолжительностью по 15 с, характеризующихся работой двигателя с минимальной частотой вращения коленчатого вала на холостом ходу. Очевидно, что наибольший расход топлива характерен для участков разгона автомобиля, поскольку на участках замедления при движении с подключенным двигателем (режим принудительного холостого хода) в современных автомобилях для экономии топлива его подача прекращается.

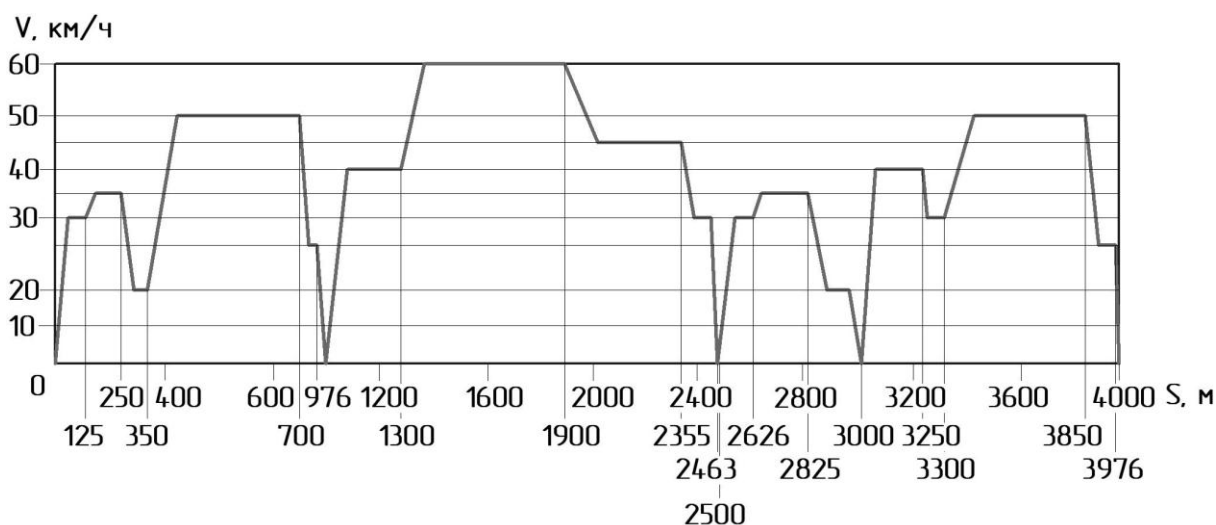


Рис. 1. Городской цикл на дороге для автотранспортных средств полной массой свыше 3,5 т, кроме городских автобусов

В математической модели представленного цикла он рассматривается как последовательный ряд участков (62 участка с учетом переключений передач по ходу движения автомобиля). Расход топлива за цикл определялся численным интегрированием. Для каждого из участков текущий удельный расход топлива двигателем автомобиля можно представить уравнением:

$$g_e = AV + BVJ + CV^3,$$

где V – скорость автомобиля;

J – ускорение автомобиля;

A , B , C – коэффициенты, вычисляемые в ходе расчета для каждого элементарного участка.

Эти коэффициенты определяются параметрами модели автомобиля, его массой, характеристиками двигателя и трансмиссии, номером включенной передачи.

Применив численное интегрирование по времени для каждого из участков цикла, в итоге были получены расходы топлива для каждого из них, а также суммарный расход за городской цикл в целом.

Такие исследования выполнены для большегрузных автомобилей-самосвалов серии КамАЗ-5511 [4]. Результаты показали, что путевой расход топлива существенно зависит от режимов движения автомобиля на отдельных участках цикла. Среди этих режимов следует выделить следующие варианты.

Движение автомобиля в цикле с максимальными ускорениями на участках разгона. Это требует работы двигателя по внешней скоростной характеристике, т.е. с коэффициентом использования мощности $k_N = 1$. Удельный расход топлива при этом, естественно, далек от минимального. Путевой расход топлива, соответственно, также возрастает, но средняя скорость прохождения цикла при этом максимальна, как это видно из рис.2. Такой режим движения принят в качестве «базового» для сравнения с остальными.

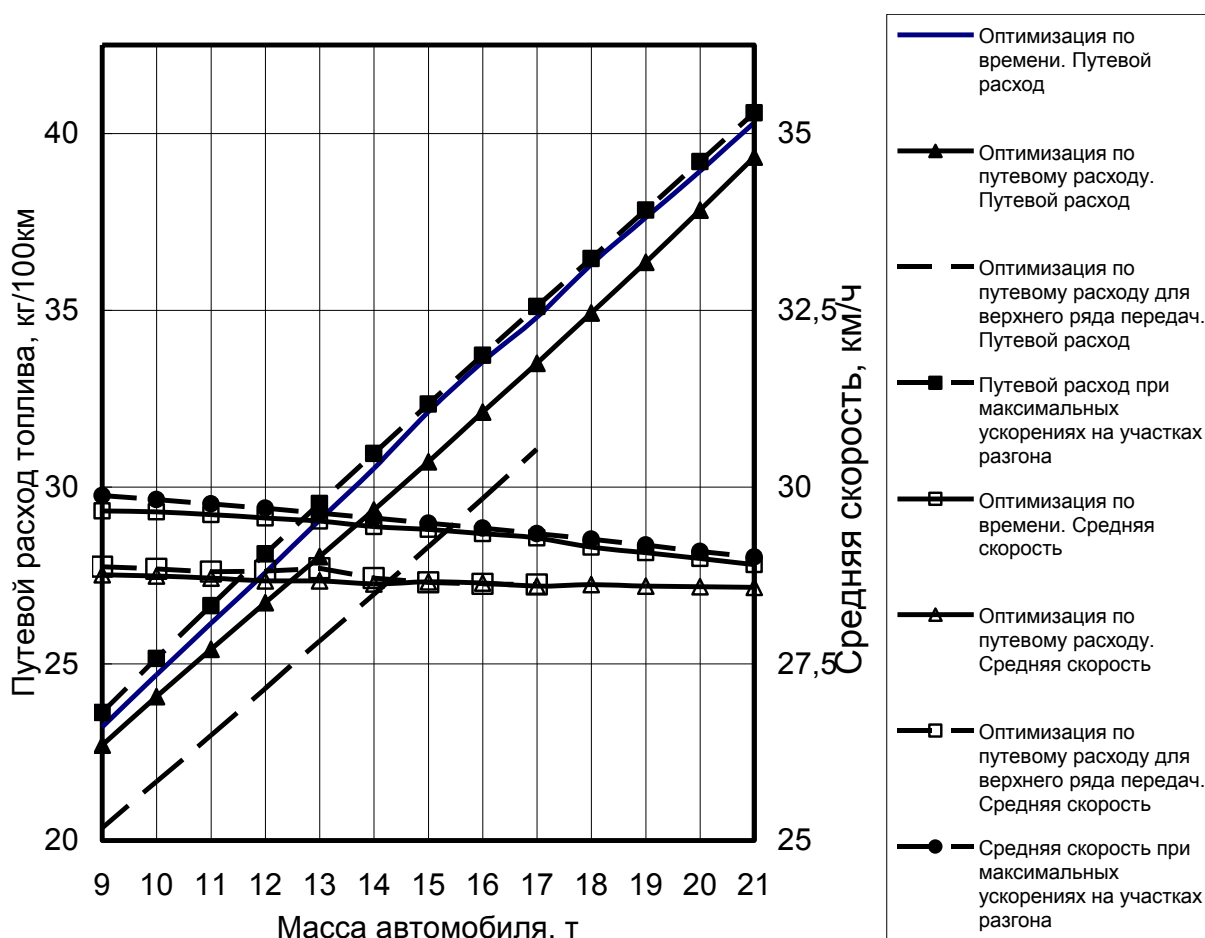


Рис. 2. Путевой расход топлива и средняя скорость движения в цикле автомобиля- самосвала КамАЗ-5511

Другой вариант предусматривает движение с постоянными ускорениями на участках разгона. Такой режим может быть реализован электронным блоком управления силовым агрегатом автомобиля. При этом также возможен вариант движения с максимальной средней скоростью в цикле. Наибольший интерес представляет режим движения с минимальным путевым расходом топлива.

Вычисление оптимальных параметров движения для всех рассмотренных режимов выполнено путем решения задачи оптимизации параметров движения в ездовом цикле. Поиск экстремума осуществляется путем последовательного вычисления значений оптимизируемого параметра в фиксированных точках заданных интервалов изменений переменных, являющихся параметрами оптимизации. Оптимизируемый параметр определяется для каждого из них. Одно из двух полученных его значений принимается для дальнейших сравнений (метод Хука-Дживса) [5,6]. Такая операция последовательно осуществляется для всех вариантов сочетаний значений независимых переменных и каждая полученная величина оптимизируемого параметра сравнивается с экстремальным ранее вычисленным его значением. После перебора всех сочетаний определяется значение оптимизируемого параметра, и полученные для него величины параметров оптимизации.

На рис.2 также представлены зависимости путевого расхода топлива в городском ездовом цикле и средняя скорость автомобиля-самосвала КамАЗ-5511 с двигателем

740.10 в зависимости от его массы – от снаряженной (9 т) до полной (19 т). Полученный вариант движения в цикле следует рекомендовать для эксплуатации автомобиля. Оптимизация по путевому расходу топлива дает возможность снизить его на 3-5% по отношению к «базовому» режиму, причем при движении на нижнем ряду передач расчетная масса автомобиля может достигать 21 т (перегрузка).

Движение с применением верхнего ряда передач коробки передач обеспечивает полное выполнение всех параметров цикла только до максимальной массы автомобиля 17 т. Экономия топлива при этом существенна и достигает 10% для порожнего автомобиля. Поэтому при неполной загрузке автомобиля (до 8 т) движение целесообразно осуществлять на верхнем ряду передач. Нижний ряд передач следует использовать при загрузке, близкой к максимальной.

Для автомобилей модификации КамАЗ-55111 большей грузоподъемности с тем же двигателем динамические свойства ухудшаются. Движение в соответствии с требованиями ездового цикла на нижнем ряду передач обеспечивается до полной массы автомобиля 21 т, что близко к его максимальной грузоподъемности (13 т) и полной массе (22,4 т). Это, по-видимому, и предопределило установку на этих автомобилях двигателей повышенной мощности 191 кВт (260 л.с.).

На рис. 3 показаны сравнительные результаты для автомобилей КамАЗ-5511 и КамАЗ-55111 с двигателями мощностью 154 кВт и 191 кВт при прохождении ездового городского цикла. При массе автомобиля 21 т путевые расходы практически одинаковы, однако при ее превышении двигатель мощностью 154 кВт не дает возможности строго выполнить все условия движения в стандартизованном городском цикле.

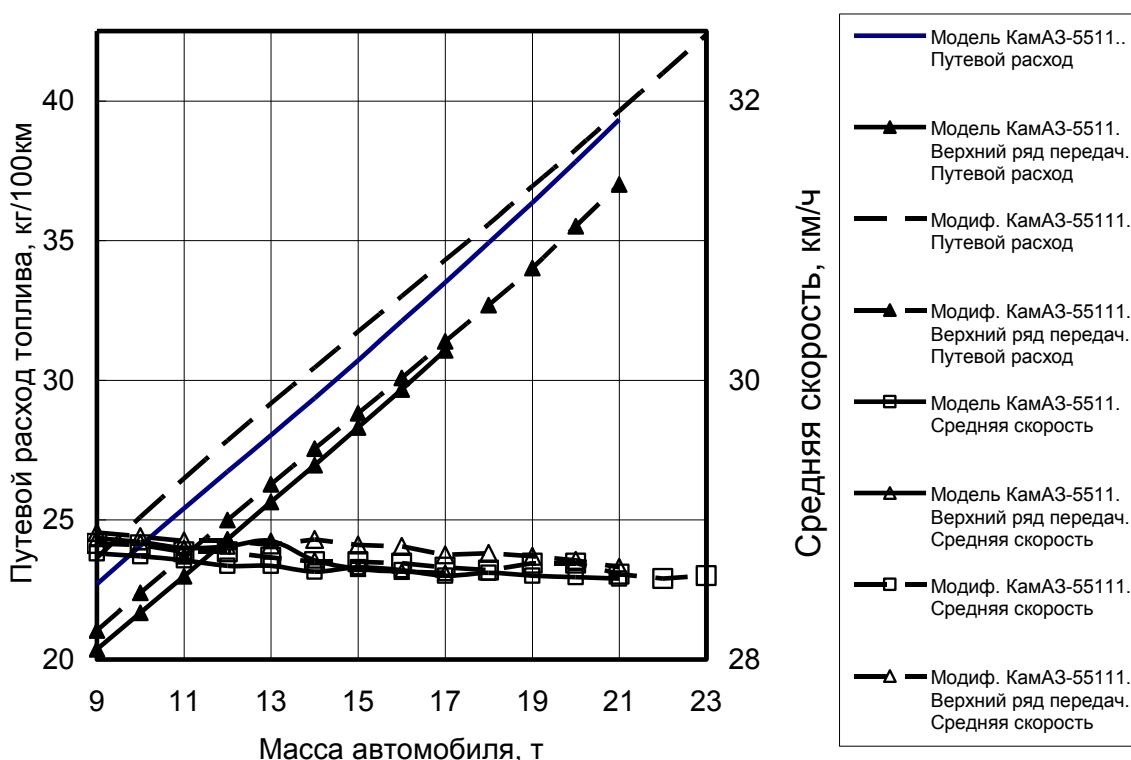


Рис. 3. Путевой расход топлива и средняя скорость движения в цикле автомобилей КамАЗ-5511 и КамАЗ-55111

В ходе практической работы автомобилей обеспечивать строгое выполнение оптимальных условий движения затруднительно даже при высокой квалификации водителей. Поэтому в процессе эксплуатации не следует ожидать значительной экономии топлива при ручном управлении коробкой передач. В то же время применение роботизированных коробок передач с комплексными электронными блоками управления силовым агрегатом позволит обеспечить движение в оптимальном режиме при соответствующей программе блока. Номер включенной передачи и режим работы двигателя при этом будут определяться массой, ускорением и скоростью движения автомобиля, уклоном дороги и качеством дорожного покрытия.

Выводы. Полученные результаты содержат рекомендации как по рациональному выбору конструктивных и режимных параметров силовых агрегатов, включающих ДВС и многоступенчатую трансмиссию, так и по рациональному управлению такими трансмиссиями в зависимости от массы автотранспортного средства при движении в городских условиях.

Результаты исследований также могут быть применены при разработке перспективных трансмиссий для автомобилей категорий N_2 и N_3 с автоматическим управлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экология автомобильного транспорта : учеб. пособие / Ю. Ф. Гутаревич, Д. В. Зеркалов, А. Г. Говорун [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Аристей, 2008. – 296 с.
2. Automotive engineering. Powertrain, chassis system and vehicle body / ed. by David A. Crolla. – Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2009. – 828 p.
3. ГОСТ Р 54810-2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2012. 23 с.
4. Машков Е. А. Техническое обслуживание и ремонт автомобилей КамАЗ-5320, 53211, 53212, 53213, 5410, 54112, 55111, 55102 / Е. А. Машков. – Москва : Третий Рим, 1997. – 88 с. – (OCR).
5. Kelley C. T. Iterative methods for optimization / C. T. Kelley. – Raleigh : North Carolina State University, 1999. – 180 p.
6. Аттетков А. В. Методы оптимизации / А. В. Аттетков, С. В. Галкин, В. С. Зарубин ; под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 440 с.

Поступила в редакцию 05.03.2019 г.

OPTIMIZATION OF THE OPERATING MODES OF THE VEHICLE POWER UNIT IN THE URBAN CYCLE

S. Gorozhankin, N. Savenkov

The potential for increasing the fuel efficiency of vehicles of categories N_2 and N_3 in the driving cycle according to GOST R 54810-2011 was investigated. This is achieved by coordinating the modes of operation of the engine and transmission. A rational choice of a number of design and operating parameters of the power unit is carried out.

The multiparameter optimization using the Hook-Jeeves method allowed for the trucks to identify rational modes of the engine management and a multi-stage gearbox. This data is investigated as a function of the gross vehicle mass.

Criteria for the efficiency of the process of movement were fuel consumption and the average speed in the driving cycle. The results are obtained on the example of the model range of the vehicle KAMAZ 5511.

Keywords: power unit, truck, driving cycle, fuel consumption, average speed, the process of optimization, driving process, gearbox, transmission.

Горожанкин Сергей Андреевич

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

Gorozhankin Sergey

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor of the department «Technical operation and service of automobile, technological machines and equipment», Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Donetsk.

Савенков Никита Владимирович

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

Savenkov Nikita

Ph. D., Associate Professor of the department «Technical operation and service of automobile, technological machines and equipment», Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, 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 высылаются.

3. Обязательные требования к оформлению статей:

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

4. Текст статьи должен соответствовать следующей структурной схеме:

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

5. Образец оформления статьи:

УДК 004.62

МЕТОДЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ

© 2019 *И.А. Третьяков, В.В. Данилов*

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

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

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

Постановка задачи. Методы сегментации экспериментальных кривых имеют...

Сегментация параллельными методами. В методах параллельной...

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Поступила в редакцию xx.xx.2019 г.

METHODS OF PARALLEL SEGMENTATION EXPERIMENTAL CURVES

Tretiakov I., Danilov V.

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

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

Третьяков Игорь Александрович

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

Tretiakov Igor

Head of laboratory 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.

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:

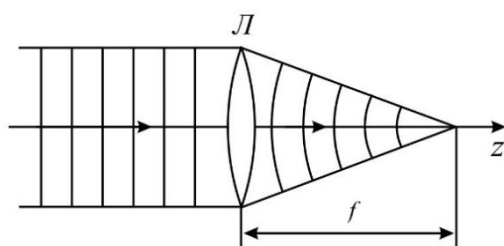


Рис. 4. Действие линзы на плоскую волну

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:

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

Главный редактор: Белоусов Вячеслав Владимирович, каб. 252.

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

Ответственный секретарь: Третьяков Игорь Александрович, каб 210.

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

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

Научное издание

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

2019. – № 1

Технический редактор: И.А. Третьяков

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

Подписано в печать 30.08.2019 г.
Формат 60×84/8. Бумага офсетная.
Печать – цифровая. Усл. печ. л. 9,53
Тираж 100 экз. Заказ. №

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