

ISSN 2663-4228

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ
*Основан
в 1997 году*

Серия Г
**Технические
науки**

2/2019

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 №6 от 02.07.2019 г.*

Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Серия Г: Технические науки

№ 2

Донецк 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Пометун Е.Д., Белоусов В.В., Болонов Н.И., Лебедев В.Н.* Конвективный теплообмен в системе «сложный датчик - окружающая среда» 3

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

- Бабичева М.В., Юрченко А.С.* Выделение особых точек отпечатков пальцев детекторами углов 10
- Жильцов В.А., Яремко И.Н.* Исследование модели туннелирования и оптимизации трафика в сетях технологии MPLS TE 16
- Рушечников Я.И., Яновский А.В., Жинкина А.С., Данилов В.В.* Электромагнитные излучения элементов электронной вычислительной техники 25

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Данилов В.В., Тимченко В.И., Третьяков И.А.* Оптические информационные технологии. Дифракция электромагнитных волн 36
- Гайван Б.В.* Сравнительный анализ безопасности сайтов ДонНУ 45
- Бабичева М.В.* Атаки на нейросетевые классификаторы 51

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Александров В.Д., Покинтелица Е.А., Соболев А.Ю., Соболев О.В.* Оценка энергоэффективности теплового аккумулятора фазового перехода на основании термограмм нагревания и охлаждения 56

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

- Bodryaga V.V., Belousov V.V., Nedopekin F.V., Bondarenko V.I., Prokhorenko S.F.* Study of the emission parameters during iron tapping from a holding furnace to a ladle in Azovstal MC 67
- Ялалова М.М., Сердюк А.И.* Перспективы переработки утильных свинцово – кислотных аккумуляторов 72
- Правила для авторов 83

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997

Series G: Technical science

No 2

Donetsk 2019

CONTENTS

INSTRUMENT ENGINEERING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Pometun E., Belousov V., Bolonov N., Lebedev V.* Convective heat exchange in the system «complex sensor – environment» 3

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Babicheva M., Yurchenko A.* Special points of fingerprints allocation by corner detectors 10
- Zhiltsov W., Yaremko I.* Study of tunneling and optimization of traffic in the networks technology MPLS TE 16
- Rushechnikov Y., Yanovsky A., Zhinkina A., Danilov V.* Electromagnetic radiation of elements of electronic computer engineering 25

COMPUTER SCIENCE AND COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

- Danilov V., Timchenko V., Tretiakov I.* Optical information technologies. Electromagnetic wave diffraction 36
- Gaivan B.* Comparative analysis of site DONNU security 45
- Babicheva M.* Neural network classifiers attacks 51

INDUSTRIAL HEAT AND POWER ENGINEERING

- Aleksandrov V., Pokyntelytsia E., Sobolev A., Sobol O.* The assessment of energy efficiency of thermal accumulator of phase change on the basis of thermograms of heating and cooling 56

ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN SERVICES

- Bodryaga V.V., Belousov V.V., Nedopekin F.V., Bondarenko V.I., Prokhorenko S.F.* Study of the emission parameters during iron tapping from a holding furnace to a ladle in Azovstal MC 67
- Yalalova M., Serdyuk A.* Prospects for processing of reclaiming lead-acid batteries 72
- Instructions for authors 83

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 536.244

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В СИСТЕМЕ «СЛОЖНЫЙ ДАТЧИК - ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

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

В статье приводятся результаты расчёта теплообмена в системе сложный датчик – окружающая среда, анализ полученных результатов, что позволит улучшить технико-экономические показатели термоанемометрических преобразователей. В качестве методов исследования предлагаются методы численного моделирования.

Ключевые слова: динамические характеристики, термоанемометр постоянной температуры, конечно-разностные схемы, теплообмен.

Введение. Современные представления о структуре турбулентных потоков сложились на основе обобщения результатов термоанемометрических измерений пульсационных характеристик в пограничных слоях, струйных течениях, в следе за плохообтекаемыми телами и др. Исследования показывают, что быстродействие датчика зависит от внешних условий и игнорирование этого явления значительно ухудшает динамические свойства измерительных систем [1].

В качестве измерителей локальной скорости предлагается использовать измерительные преобразователи на базе термоанемометра постоянной температуры с термистором *Epcos G550* в роли чувствительного элемента. Выбор термисторов *Epcos G550* обусловлен временной стабильностью и хорошей повторяемостью градуировочных коэффициентов.

Целью работы является создание математической модели расчёта теплообмена в системе сложный датчик – окружающая среда, анализ полученных результатов, что позволит улучшить технико-экономические показатели термоанемометрических преобразователей и расходомеров газа на их основе.

В качестве метода исследования предлагается метод численного моделирования, позволяющий не только подробно исследовать процесс, но и обнаружить неизвестные аспекты в период моделирования. 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 [2].

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 термоанемометра постоянной температуры с термистором *Ercos G550*, в качестве чувствительного элемента, путем воздействия ступенчатого испытательного сигнала (функции Хэвисайда) методом 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 нагрет до постоянной температуры 120°C и прогревает провода и стеклянную оболочку [2].

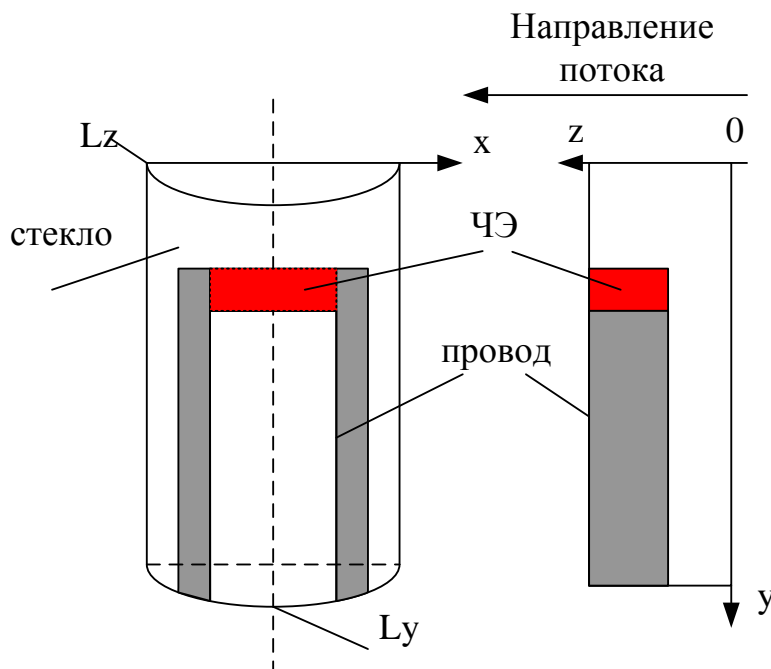


Рис. 1. Пространственная схема области (а), проекция на плоскость yz – (б)

Уточненное уравнение градуировочной характеристики термоанемометрического термисторного измерительного преобразователя скорости (ТТИПС) имеет вид [2]:

$$\frac{W}{(T_w - T_g)} \cdot \frac{r}{S} = \frac{L_o \cdot \left(\frac{T_g}{T_w}\right)^a \cdot (A + B \cdot \text{Re}^n)}{\frac{L_o \cdot \left(\frac{T_g}{T_w}\right)^a}{\lambda_g} + A + B \cdot \text{Re}^n}, \quad (1)$$

где: W - тепловой поток, T_w, T_g – температура перегрева термистора и потока воздуха, r – радиус термистора, S – площадь поверхности термистора, λ_g – теплопроводность газа, A, B, n, L_0 - неизвестные коэффициенты, подлежащие определению при индивидуальной градуировке преобразователь.

В сравнении с общепринятым для ниточных и пленочных термоанемометров уравнением:

$$\frac{W}{(T_f - T_g)S} \cdot \frac{l}{\lambda_g} = A + BRe^n, \quad (2)$$

уточненный вид (1) для чувствительных элементов имеющих защитную оболочку обеспечивает повышение точности измерений скорости газа для термоанемометров постоянной температуры в среднем в 2,9 раза [3]. Таким образом, преимущество уточненного уравнения градуировочной характеристики термоанемометра (1.) перед ранее используемой (2) состоит в учете влияния теплопроводности оболочки термистора на условия его теплообмена с потоком газа, что позволило повысить точность измерений расхода газа [2,3].

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 [4].

В данной работе рассматривается стеклянный параллелепипед прямоугольного сечения. В середину параллелепипеда помещен датчик. От датчика вдоль длинной грани параллелепипеда идет провод (рис. 1) (теплофизические и геометрические параметры стеклянной оболочки, провода и датчика представлены в таблице 1). Датчик нагрет до постоянной температуры 120°C , т.о. прогревая провод и стеклянную оболочку.

Таблица 1- Теплофизические и геометрические параметры стеклянной оболочки, провода и датчика

Наименование	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$C_p, \text{кДж}/\text{кгК}$	$\lambda, \text{Вт}/\text{мК}$	Размер, м
Стекло	2200	0,8	0,96	$0,0015 \times 0,005 \times 0,0015$
Провод	8500	0,35	125	$0,0003 \times 0,0003 \times 0,0015$
Датчик	2000	1,0	100	$0,0006 \times 0,0003 \times 0,0003$

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

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} a \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} a \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} a \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (3)$$

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 .

Таким образом, имеем следующие начальные условия: $t = 0$: $T_d = 120^{\circ}\text{C}$; $T_c = T_n = 20^{\circ}$.

Граничные условия:

на плоскости $z=0$ условие отсутствия потока: $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$,

на плоскости $x=L_z$ также ставится это условие: $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$,

и на плоскости $z=L_y$: $-\frac{\partial T}{\partial x} = 0$,

на плоскостях $z=0$, $x=0$ и $z=L_x$ выполняется граничное условие третьего рода, т.е. на плоскости $z=0$: $-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = -\alpha / 2(T - T_{cp})$;

на плоскости $x=0$: $-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = -\alpha / 2(T - T_{cp})$;

и на плоскости $z=L_x$: $-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -\alpha(T - T_{cp})$, где величина α определяется из условий набегающего потока по эмпирической формуле $Nu = 0,018Re^{0,8}C_1$; где C_1 определяется согласно работе [5].

С учетом того, что отношение длины системы к ее ширине постоянна $\frac{L_j}{L_k} = 6,6$ – значение $C_1 = 1,46 / \left(\frac{L_j}{L_k}\right)^{0,1}$, тогда определяя число Рейнольдса как $Re = \frac{WL_j}{\nu_{воз}}$

получаем, что $Nu = \frac{0,18 Re^{0,8} 1,46}{\left(\frac{L_j}{L_k}\right)^{0,1}}$, коэффициент теплообмена, в свою очередь,

определяется $\alpha = \frac{Nu \lambda_{воз}}{L_j}$.

Зависимость α от скорости набегающего потока представлена в таблице 2.

Таблица 2 - Зависимость коэффициента теплообмена α от скорости набегающего потока.

Скорость обтекания датчика, $V, м/с$	Re	Nu	α , Вт/(м ² К)
0	0	0	0
10	1041,67	56,42	519,06
20	2083,3	98,30	904,36
30	3125,0	135,81	1249,36

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:

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

$$\omega_h = \begin{cases} x = \sum_{i=0}^I h_i; i = 0, 1, 2, \dots, I; \\ y = \sum_{j=0}^J h_j; j = 0, 1, 2, \dots, J; \\ z = \sum_{k=0}^K h_k; k = 0, 1, 2, \dots, K. \end{cases} \quad (4)$$

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

Введем неравномерную сетку x_i, y_j, 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: $\hat{h}_i = 0,5(x_{i+1} - x_{i-1}), \hat{h}_j = 0,5(y_{j+1} - y_{j-1}), \hat{h}_k = 0,5(z_{k+1} - z_{k-1})$.

Применение неявной разностной схемы для уравнений переноса позволит повысить устойчивость алгоритма, что проявляется в увеличении допустимых значений шага τ . Несмотря на то, что при переходе к неявным аппроксимациям время счета на каждом слое возрастает, общий расчет машинного времени сокращается из-за уменьшения числа расчетных слоев. Неявные схемы имеют более сложную конструкцию, чем явные, а значит, требуют дополнительных усилий при разработке схемы и ее отладке на ЭВМ. Она перспективна в первую очередь для решения стационарных задач по методу установления, а также при расчете крупномасштабных нестационарных процессов, когда выбор большого шага по времени не противоречит физическому смыслу.

Наиболее эффективные неявные методы, основаны на идее экономичных методов [4], позволяющих свести решение многомерных задач к решению последовательности одномерных задач. Данная задача реализовалась в среде программирования Delphi 7 и имеет дружелюбный интерфейс, позволяющий легко управлять процессом и анализировать полученные результаты.

При рассмотрении, влияние скорости на обтекание системы на внутренней и внешней области показывает, что для $t=0,001c$ во внутренней части системы влияние скорости проявляется незначительно рис.2-3.



Рис. 2. Изменение температуры системы в зависимости от скорости обтекания внешней стенки в момент времени $t = 0,001c$; (кривая 1 для 10 горизонтов в центре системы; кривая 2 для 10 горизонтов на внешней стенке системы)

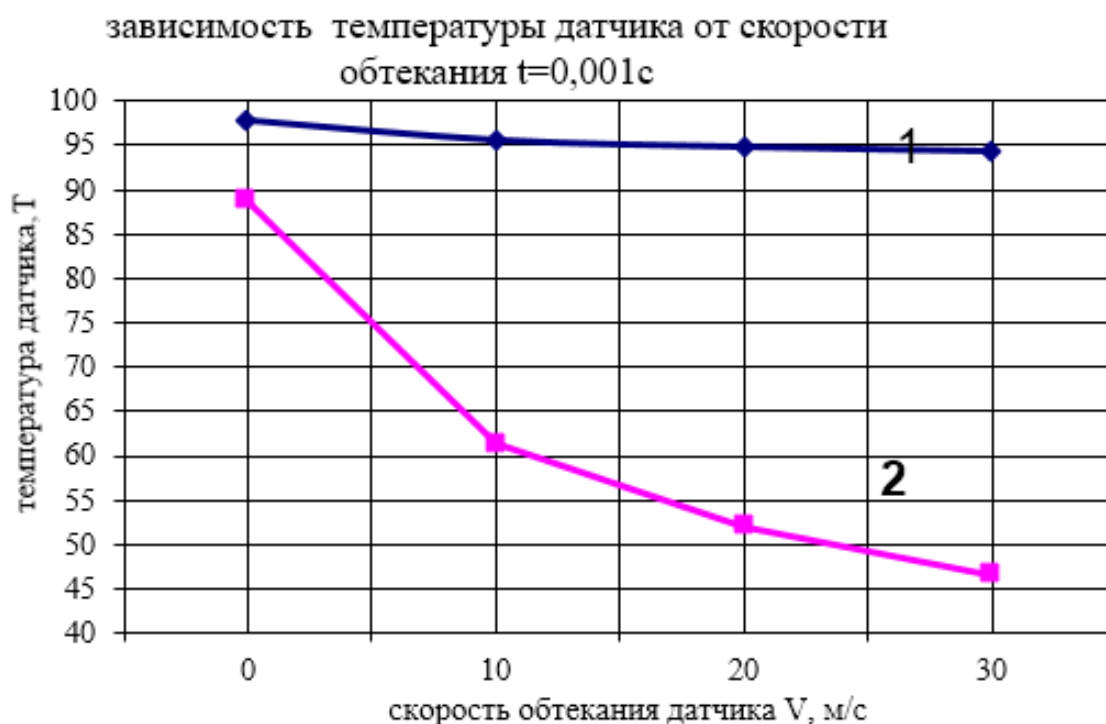


Рис. 3. Изменение температуры системы в зависимости от скорости обтекания внешней стенки в момент времени $t = 0,001 c$; (кривая 1 для 50 горизонта в центре системы; кривая 2 для 50 горизонта на внешней стенке системы)

Со временем ($t=0,01c$) характер вышеуказанных зависимостей изменяется. Существенно проявляется обтекание системы потоком воздуха. Теплоотвод набегающего потока от поверхности датчика приводит к понижению температуры. 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 [6].

Выводы. Сформулирована математическая модель, разработан вычислительный алгоритм, и программный продукт расчета теплофизических процессов в системе датчик – стеклянная оболочка – окружающая среда, позволяющие определить теплофизическую обстановку в системе в зависимости от скорости набегающего потока воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. МИ 2090-90. Определение динамических характеристик аналоговых СИ с сосредоточенными параметрами. Общие положения : Введ. 1991–08–01. – Москва : Из-во стандартов, 1991. – 34 с.
2. Ростовская Д.А. Расчет теплообмена в системе сложный датчик окружающая среда/ Д.А. Ростовская, В.В. Белоусов, Ю.Д. Украинский // Доклады “Международной научно-методической конференции”.- Днепропетровск, 2006. – С. 93-94.
3. Зори А. А. Повышение эффективности градуировки первичных измерительных преобразователей термоанемометров / А. А. Зори, Д. Н. Кузнецов // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк : ДонДТУ, 2001. – Вип. 25. – С. 183-189.

4. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1989. – 615 с.
5. Повх И. Л. Техническая гидродинамика / И. Л. Повх. – Москва : Машиностроение, 1964. – 507 с.
6. Зори А. А. Система автоматизации градуировки первичных измерительных преобразователей термоанемометров / А. А. Зори, Ю. Д. Украинский, Д. М. Кузнецова // Наукові праці Донецького державного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк : ДонДТУ, 2000. – Вип. 20. – С. 260-268.

Поступила в редакцию 14.05.2019 г.

CONVECTIVE HEAT EXCHANGE IN THE SYSTEM «COMPLEX SENSOR – ENVIRONMENT»

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

The article presents the results of the calculation of heat transfer in a complex sensor - environment system, an analysis of the results, which will improve the technical and economic indicators of hot-wire anemometric converters. As research methods are proposed the methods of numerical modeling.

Keywords: dynamic characteristics, hot-wire anemometer, finite-difference schemes, heat transfer.

Пометун Екатерина Дмитриевна

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

Pometun Katerina

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

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.

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.

Болонов Николай Иванович

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

Bolonov Nikolay

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.

Лебедев Владимир Николаевич

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

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.

004.932.72'1

ВЫДЕЛЕНИЕ ОСОБЫХ ТОЧЕК ОТПЕЧАТКОВ ПАЛЬЦЕВ ДЕТЕКТОРАМИ УГЛОВ

© 2019 М.В. Бабичева, А.С. Юрченко

Экспериментально доказана возможность применения детекторов углов для выделения особых точек локальных признаков отпечатков пальцев. Проведен сравнительный анализ результатов выделения особых точек угловыми детекторами Харриса и FAST с широко используемым методом выделения 8-связной области смежных пикселей. Рассмотрены условия, при которых применение детекторов углов эффективно.

Ключевые слова: отпечатки пальцев; выделение особых точек; детекторы углов; угловой детектор Харриса; угловой детектор FAST; Computer Vision Toolbox.

Выделение локальных признаков. В широко распространенных в настоящее время системах аутентификации по отпечаткам пальцев играет большое значение качество обработки изображений отпечатков и выделения локальных признаков (минуций), уникальных для каждого человека. Одним из применяемых методов выделения локальных признаков является нахождение особых точек отпечатка (окончаний и ветвлений) для сохранения в базе данных и последующего сравнения с набором особых точек предъявляемого отпечатка [1]. Часто нахождение особых точек производится методом анализа черных и белых пикселей в выделенной 8-связной области смежных пикселей бинаризованного изображения. Данный метод популярен в силу простоты реализации и скорости работы, однако предъявляет относительно высокие требования к качеству изображения папиллярного узора, сканер должен обеспечивать разрешение не меньше 300 dpi, а лучше – около 500 dpi [2].

Целью данной работы является исследование возможности применения алгоритмов, находящих углы на изображениях (детекторов углов) в задаче поиска особых точек отпечатков пальцев. Для данного класса задач детекторы углов ранее не применялись.

Детекторы углов. В последнее время разработано большое количество алгоритмов для определения углов на изображении, среди них алгоритмы основанные на определении градиента яркости квадратного окна (Моравеса, Харриса, Фёрстнера, Ши-Томаси) и на анализе круговых окрестностей пикселей (SUSAN, FAST, CSS). Для исследования были выбраны метод Харриса вычисляющий производные яркости по множеству направлений, и метод FAST (Features from Accelerated Segment Test), рассматривающий окружности из 16 пикселей вокруг каждой точки и сравнивающий яркости пикселей окружения по заданному «угловому» шаблону. Оба этих метода хорошо зарекомендовали себя в задачах выделения углов на изображениях, связанных с машинным зрением [3].

На рисунке 1 представлены результаты работы этих алгоритмов на изображении здания физико-технического факультета. Изображения были получены в результате работы программы, разработанной в среде Computer Vision Toolbox. Видно, что

алгоритм FAST выделил гораздо больше особых точек и не всегда эти точки соответствуют углам на изображении. Детекторы углов могут работать с полутоновыми и бинарными изображениями. Для выделения локальных признаков отпечатков пальцев обычно используются бинарные изображения, причем отпечаток проходит предварительную обработку.



Рис. 1. Выделение углов, слева – метод Харриса, справа – метод FAST

Если бинаризовать изображение с помощью разработанного авторами итеративного алгоритма и снова применить детекторы, то получатся результаты, представленные на рисунке 2 [4].



Рис. 2. Выделение углов на бинаризованном изображении, слева – метод Харриса, справа – метод FAST

Для бинаризованного изображения метод Харриса показал больше особых точек, чем метод FAST, однако они тоже не все соответствуют углам на изображении.

Алгоритм подсчета черных и белых пикселей в выделенной 8-связной области смежных пикселей. Идея этого алгоритма состоит в том, что для выделения особых точек изображение разбивается на блоки 3x3 пикселей и к 8-ми соседним с центральным пикселем точкам применяется преобразование (1).

$$cn(p) = \frac{1}{2} \sum_{i=1...8} |val(p_i) - val(p_{i-1})|, \quad (1)$$

где p - значение яркости для каждого пикселя, находящегося рядом с пикселем центрального блока, $val \in \{0,1\}$ – бинарное значение интенсивности пикселя.

После этого подсчитывается число чёрных (ненулевых) пикселей, находящихся вокруг центра. Пиксель в центре считается минуцией, если он сам ненулевой и соседний с ним пиксел ненулевой (минуция «окончание»), или если рядом с ненулевым пикселем еще три ненулевых (минуция «ветвление»). Координаты обнаруженных минуций изображения будут представлять собой уникальный набор значений, принадлежащий конкретному отпечатку. На рис. 3 показан пример соответствующих минуций [1].

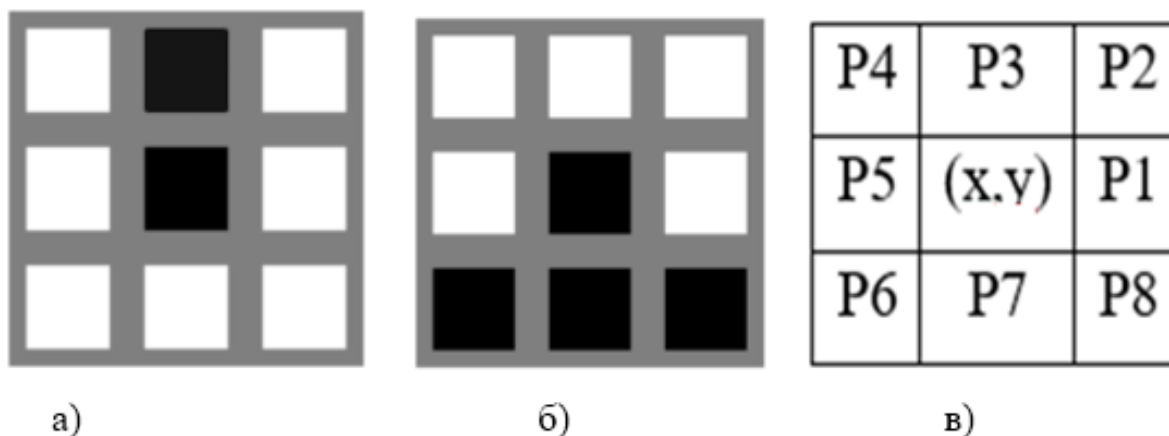


Рис. 3. 8-связная область смежных пикселей. а) окончание, б) ветвление, в) блоки 3x3

Подсчет числа черных пикселей вокруг текущего пикселя основан на анализе 8-связной области смежных пикселей.

Применение детекторов углов к изображениям отпечатков пальцев. Полутоновые изображения отпечатков снимались сканером Microsoft 1033, с разрешением 300 dpi. Затем проводилась предобработка изображений отпечатков следующими методами: контрастно-ограниченная адаптивная эквализация гистограммы для фильтрации и повышения контрастности, итеративный алгоритм бинаризации с обработкой краев изображения, скелетизация методом дилатации. В результате получались изображения, представленные на рисунке 4. Чтобы оценить условия, при которых лучше применять тот или другой метод, для выделения особых точек использовались изображения, с предобработкой и без предобработки. Каждое изображение подавалось на детекторы Харриса и FAST, а также на вход алгоритма подсчета черных и белых пикселей в выделенной 8-связной области смежных пикселей.



Рис. 4. Слева- изображение отпечатка, полученное со сканера, справа – изображение после предварительной обработки

Выделенные особые точки представлены на рисунке 5 для всех трех алгоритмов. Видно, что количество их разное, в зависимости от метода определения. Для детектора Харриса их было 199, для детектора FAST - 321, для выделенной 8-связной области - 96.



Рис. 5. Выделенные особые точки. а) детектор углов Харриса, б) детектор углов FAST в) алгоритма подсчета черных и белых пикселей в выделенной 8-связной области

Из рисунка видно, что наилучшие результаты показал алгоритм Харриса. Алгоритм FAST дает слишком много точек, точки, выдаваемые алгоритмом выделенной 8-связной области в 40% случаев не попадают на минувии. Производилось также и выделение особых точек на бинаризованном изображении без скелетизации (рис.6). Как и в первом случае лучше всего особые точки выделил детектор Харриса, а хуже всего - алгоритм подсчета черных и белых пикселей в выделенной 8-связной области смежных пикселей.



Рис. 6. а) - бинаризованное изображение отпечатка до скелетизации Выделенные особые точки - б) детектором углов Харриса, в) детектором углов FAST г) алгоритмом подсчета черных и белых пикселей в выделенной 8-связной области

В этом случае меньше всего точек выделил метод подсчета черных и белых пикселей в выделенной 8-связной области – 234, метод Харриса выделил 400 точки, а метод FAST – 597. Причем точки, выделенные детекторами Харриса и FAST в большинстве, совпали, в то время как точки, выделенные алгоритмом подсчета черных и белых пикселей в большинстве случаев не совпали ни с минуциями, ни с точками, выделенными детекторами углов.

Результаты. Результаты компьютерных экспериментов представлены в таблице 1. В столбце справа находятся усредненные данные для 5-ти отпечатков одного и того же пальца с предварительной обработкой и без нее. Для сравнения было подсчитано вручную среднее число особых точек, совпадающих с минуциями для тех же отпечатков. Подсчет осуществлялся только на скелетизированных изображениях, поскольку сделать это на бинаризованных изображениях без предварительной обработки было затруднительно. Это среднее количество особых точек, совпадающих с минуциями получилось 203.

Таблица 1. Среднее количество выделенных особых точек на скелетизированном изображении и изображении без предварительной обработки

Алгоритм определения особых точек	Среднее количество выделенных особых точек на скелетизированном изображении/ изображении без предварительной обработки
подсчета черных и белых пикселей в выделенной 8-связной области	90/231
Харриса	190/352
FAST	320/554

Для обработанных скелетизированных изображений детектор углов Харриса дал наибольшее количество точек, совпадающих по количеству и расположению, с подсчитанными вручную минуциями. В случае изображения без предварительной обработки наибольшее количество совпадений по количеству и расположению показал традиционный метод подсчета черных и белых пикселей в выделенной 8-связной области. Отсюда можно сделать вывод, что использование детекторов углов для определения особых точек целесообразно для изображений с предварительной

фильтрацией, бинаризацией и скелетизацией (80% совпадений с найденными вручную особыми точками). В случае невозможности проведения предварительной обработки следует использовать алгоритм подсчета черных и белых пикселей в выделенной 8-связной области, который дает 70% совпадений с найденными вручную минущиями. В дальнейшем предполагается провести эксперименты с другими детекторами углов, причем целесообразно проверить алгоритмы, основанные на определении градиента яркости квадратного окна, поскольку алгоритмы, основанные на анализе круговых окрестностей пикселей, дают слишком много лишних точек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of Fingerprint Recognition / D. Maltoni, D. Maio, A. K. Jain, S. Prabhakar. –New York : Springer, 2003. – 348 p.
2. Yager N. Fingerprint classification: a review / N. Yager, A. Amin // Pattern Analysis & Applications. –2004. – Vol. 7, Is. 1. – P. 77-93.
3. Xia G.-S. Accurate Junction Detection and Characterization in Natural Images / G.-S. Xia, J. Delon, Y. Gousseau // International Journal of Computer Vision (IJCV). – 2014. –106 (1). – P. 31-56.
4. Бабичева М. В. Итеративный алгоритм пороговой бинаризации для обработки отпечатков пальцев в биометрических системах доступа / М. В. Бабичева, А. С. Юрченко // Вестник Донецкого национального университета. Сер. Г. Технические науки. – 2018. – № 3. – С. 41-46.

Поступила в редакцию 27.04.2019 г.

SPECIAL POINTS OF FINGERPRINTS ALLOCATION BY CORNER DETECTORS

M. Babicheva, A. Yurchenko

Experimentally proved the possibility of using angle detectors to highlight the specific points of fingerprints local signs. A comparative analysis of the results of singling out the special points with the Harris and FAST angular detectors and the widely used method selecting the 8-connected region of adjacent pixels has been carried out. The conditions when angle detectors use is effective are considered.

Keywords: fingerprints, special points, angle detectors, Harris angle detector, FAST angular detectors, Computer Vision Toolbox.

Бабичева Маргарита Вадимовна

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

Babicheva Margarita

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

Юрченко Артем Сергеевич

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

Yurchenko Artyom

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

УДК 621.396.4

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ТУННЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ТРАФИКА В СЕТЯХ ТЕХНОЛОГИИ MPLS TE

© 2019 В.А. Жильцов, И.Н. Яремко

Проанализирована модель пересылки пакетов в технологии MPLS TE и, в частности, механизм туннелирования в сети. В статье представлена математическая модель управления транспортной сетью многопротокольной коммутации по меткам. Исследованы механизмы минимизации общей стоимости маршрутизации, балансировки нагрузки и минимизации количества LSP в сетях MPLS.

Ключевые слова: механизм; сеть; управление трафиком; качество обслуживания; туннель; коммутация по меткам; протокол распределения меток; минимизация; балансировка.

Введение. С внедрением приложений QoS (Quality of Service) в Интернет, было разработано много новых сетевых технологий. Техническая поддержка становится важной в рамках этих технологий для удовлетворения растущего спроса и разнообразия запросов клиентов. Оптимизация сети стала большой проблемой для поставщиков услуг Интернета (ISP) из-за жестких ограничений, налагаемых ограниченным ресурсом емкости и потребностей клиентов. Естественным продолжением этих революционных преобразований в направлении «вниз» – на уровень транспортной инфраструктуры стали транспортные сети IP/MPLS. Сети MPLS, основанные на принципе пересылки меток, позволяют классифицировать и определять приоритетность трафика. Целью данной статьи является исследование механизмов туннелирования в сети IP/MPLS для управления заданным QoS мультисервисного трафика и поиск эффективной организации туннелей в сети MPLS на основании данного анализа.

Функциональная модель механизма туннелирования в сети IP/MPLS. MPLS является высокопроизводительной технологией для передачи пакетов IP через сеть. Основная идея MPLS заключается в назначении меток фиксированной длины пакетам на входных маршрутизаторах (LER). По всей сети пакеты пересылаются в соответствии с этими метками. Метки удаляются на исходящих маршрутизаторах (маршрутизаторах, где пакеты выходят из сети). В MPLS также возможно классифицировать трафик понятием класса эквивалентности пересылки (FEC): группа пакетов IP, которые должны быть переданы тем же самым способом с той же обработкой через сеть. FEC IP-пакета определяется на входном маршрутизаторе до того, как он войдет в сеть. Эта задача требует анализа заголовка пакета для получения необходимой информации для классификации пакета. Назначение пакета, его класс обслуживания, параметры маршрутизации, требования политики используются для классификации пакетов. Входной маршрутизатор назначает метку пакету согласно его FEC и передает его одному из его соседей, определенных его LSP.

Путь коммутации по меткам (LSP) – путь, создаваемый цепочкой одной или нескольких LSR. По LSP следуют пакеты от определенного FEC. LSP создаются некоторыми протоколами распределения меток.

Рисунок 1 показывает, как LSR пересылают пакеты своим соседям. Маршрутизаторы только проверяют метки пакетов для поиска связанной информации в своих таблицах пересылки меток. После того, как они заменяют текущую метку на новую, они передают пакет к следующему маршрутизатору в LSP. Как объяснено

ранее, таблицы пересылки созданы при помощи некоторого протокола распределения метки.

На данный момент в MPLS TE используется два таких протокола: RSVP с расширением и CR-LDP. RSVP-TE (Resource Reservation Protocol-TE) и CR-LDP (Constraint-based Routing Label Distribution Protocol) входят в число известных протоколов распределения меток. Эти протоколы создают LSP, прежде чем первый пакет определенного FEC войдет в сеть. Сообщения этих протоколов передаются от одного узла сети к другому соответственно данным о IP-адресах маршрута.

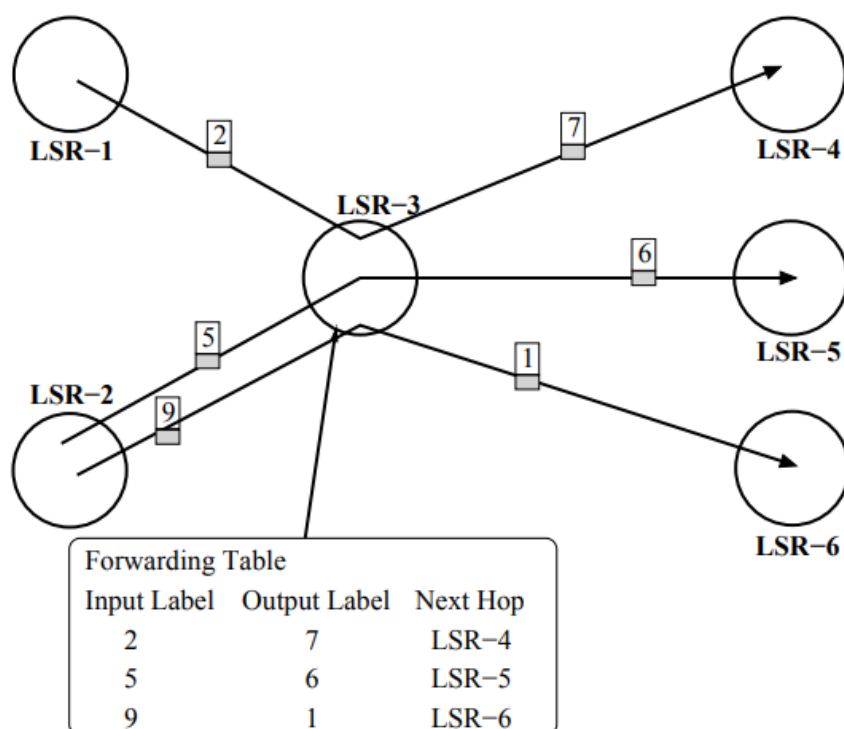


Рис. 1. Модель пересылки пакетов в соответствии с их метками в сети MPLS

В технологии MPLS-TE предусмотрено два способа пересылки пакетов. При одном способе каждый маршрутизатор определяет только часть промежуточных узлов от одного пограничного устройства до другого, а остальные промежуточные узлы выбираются устройством LSR самостоятельно. При другом определяются все промежуточные узлы между двумя пограничными устройствами. Второй способ основан на том, что маршрутизаторы на пути следования пакета действуют в соответствии с инструкциями, полученными от одного из LSR данного LSP (обычно – от находящегося ниже в LSP-пути, что позволяет совместить процедуру «раздачи» этих инструкций с процедурой распределения меток). Распределение меток между LSR приводит к установлению внутри домена MPLS путей с коммутацией по меткам.

Вся операция требует лишь одноразовой идентификации значений полей в одной строке таблицы. Это занимает гораздо меньше времени, чем сравнение IP-адреса отправителя с наиболее длинным адресным префиксом в таблице маршрутизации, которое используется при традиционной маршрутизации. Таким образом, главная особенность MPLS – отделение процесса маршрутизации пакета от необходимости анализа IP-адресов в его заголовке – что открывает ряд преимуществ ее использования для сокращения задержек и обеспечения QoS трафика реального времени.

Весьма важным достоинством MPLS является возможность в рамках архитектуры MPLS вместе с пакетом передавать не одну метку, а целый стек меток. Операции добавления/изъятия метки определены как операции на стеке (push/pop). Результат коммутации задает лишь верхняя метка стека, нижние же передаются прозрачно до операции изъятия верхней. Такой подход позволяет создавать иерархию потоков в сети MPLS и организовывать туннельные передачи [1].

Определение проблемы. Для удобства представления введен термин traffic request.

Traffic request (запрос трафика) – это агрегация потоков трафика из одного класса. Для полного определения запроса трафика необходимы следующие атрибуты:

- ingress router,
- egress router,
- ожидаемый спрос на пропускную способность,
- ограничения, выставленные на доступные пути из-за требований и политик QoS.

Основная проблема состоит в том, чтобы выбрать оптимальные LSP для traffic request от различных классов обслуживания в сети. Классы обслуживания включают как трафик с требованиями QoS, так и трафик best-effort (модель негарантированной доставки). В контексте QoS разумно поместить эти классы обслуживания в приоритеты так, чтобы traffic request присвоили относительную важность. Например, когда три уровня приоритета были определены, как ”высокий”, ”средний” и ”низкий”, traffic request для голосовых и видео данных могут получить уровень приоритета ”высокий”, в то время как traffic request к всемирной сети и негарантированные сведения могут быть отнесены к ”средним” и ”низким”, соответственно. Определение набора приоритетов и назначений может варьироваться от сети к сети.

Описание модели. Для математической модели сеть представляется в виде ориентированного графа, где $V = \{1, 2, \dots, N\}$ и $E = \{1, 2, \dots, M\}$ определяет набор маршрутизаторов и каналов соответственно. Направленное ребро m имеет мощность u_m (в единицах/сек).

Набор всех запросов трафика обозначается T . t^{th} запрос трафика имеет требование пропускной способности d_t . Базовая модель, рассмотренная в этой статье, предполагает только один уровень приоритета. Применение маршрутизации на основе ограничений может выявить некоторые ограничения на LSP. Производительность маршрутизации трафика QoS сильно зависит от джиттера, задержки и надежности. Поскольку число переходов на LSP уменьшается, запрос трафика испытывает меньшие джиттер и задержки. Кроме того, использование меньшего количества переходов повышает надежность передачи запроса трафика, так как вероятность сбоя на LSP уменьшается. Поэтому traffic request от классов QoS могут иметь ограничение на количество переходов на их LSP. Для реализации этого ограничения установлен альтернативный путь $P_t = \{p_t^1, \dots, p_t^{L_t}\}$, который определяется для каждого запроса трафика, где L_t обозначает количество путей в наборе. Traffic request услуг низкого приоритета могут не иметь такого ограничения.

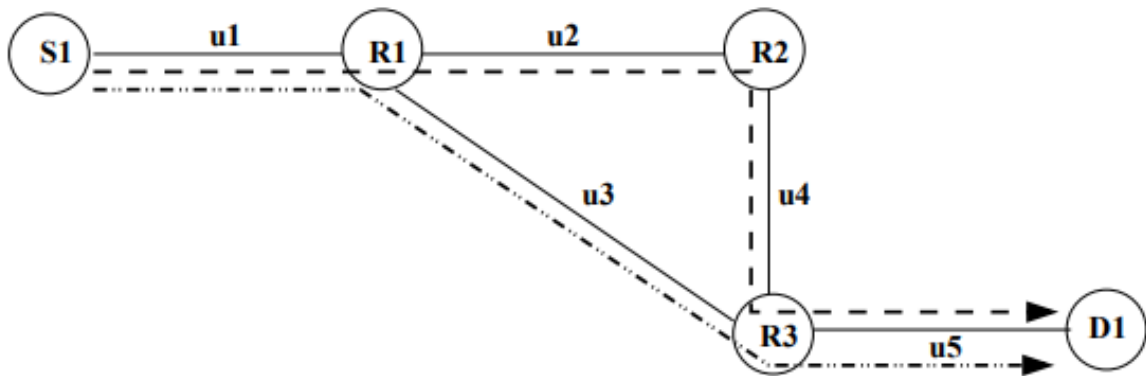


Рис. 2. LSP могут быть ограничены из-за реализации QoS и основанной на политике маршрутизации

На рисунке 2 представлен пример топологии для сети MPLS с одним входным маршрутизатором ($S1$), одним выходным маршрутизатором ($D1$) и тремя основными маршрутизаторами ($R1$, $R2$ и $R3$). Существует два запроса трафика от $S1$ до $D1$: один для трафика QoS и один для трафика best-effort. Возможны два различных пути между $S1$ и $D1$: $p1 = (S1, R1, R2, R3, D1)$ и $p2 = (S1, R2, R3, D1)$. Трафик QoS имеет требование, что путь может быть назначен только не более чем с четырьмя прыжками на пути. Таким образом, допустимые наборы путей для запросов трафика следующие:

$$P_{BE} = \{ p^1, p^2 \}, \quad (1)$$

$$P_{QoS} = \{ p^2 \}. \quad (2)$$

Когда запросы трафика, как трафик best-effort, не имеют ограничения относительно количества переходов на их путях, у них есть набор альтернативного пути, который состоит из всех путей между их входным и выходным маршрутизатором. Однако по мере увеличения размера сети число возможных путей между любыми двумя узлами растет в геометрической прогрессии. В этом случае число доступных путей должно быть ограничено.

Минимизация общей стоимости маршрутизации. Первая задача в модели направлена на минимизацию затрат на маршрутизацию, которые испытывают запросы трафика. Ребру m присваивается значение c_m для представления стоимости маршрутизации на этом звене. Стоимость соединения может зависеть от некоторых параметров, а именно от скорости, длины и надежности соединения. Первая цель рассматриваемой модели – ориентированность на трафик, а не на сеть. Далее введены индикаторные переменные $a_{t,m}^l$, которые равны 1, если использует ссылку m , и 0 в противном случае. Стоимость участка обозначается C_t^l и равна сумме затрат на его звенья [2]:

$$C_t^l = \sum_{m \in E} c_m a_{t,m}^l. \quad (3)$$

Пусть x_t^l представляет объем трафика, который маршрутизируется на p_t^l

$$\sum_{l=1}^{L_t} x_t^l = d_t \quad \forall t \in T, \quad (4)$$

$$x_t^l \geq 0 \quad \forall t \in T \text{ и } \forall l \in \{1, \dots, L_t\}. \quad (5)$$

Ограничения (2) гарантируют, что сумма маршрутизируемого трафика удовлетворяет спрос для каждого запроса трафика.

Первая целевая функция минимизирует сумму затрат на маршрутизацию:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{l=1}^{L_t} C_t^l x_t^l. \quad (6)$$

Балансировка нагрузки. Вторая цель заключается в том, чтобы избежать широкого использования одних каналов связи, оставляя другие менее используемыми. Коэффициент использования канала определяется долей общей нагрузки на его емкость. Минимизация максимального использования канала связи в сети является наиболее широко используемой целевой функцией для балансировки нагрузки. Однако в данной модели предлагается модифицированный вариант функции [2]. В их исследовании кусочно-линейная функция стоимости определяется для каждого звена на основе коэффициента использования канала. Цель состоит в том, чтобы минимизировать сумму затрат звена. Суть функции состоит в том, чтобы ограничить отправку пакетов по звену, поскольку ее использование становится выше.

Функция балансировки нагрузки, используемая в этом исследовании, отличается от исходной функции тем, что чрезмерное использование связей не допускается и имеет разные точки останова. На самом деле точная форма функции не имеет существенного значения; важно то, что она является кусочно-линейной возрастающей и выпуклой функцией. Полное определение функции сильно зависит от сети и спроса на трафик. Функция балансировки нагрузки для канала производительностью 1 ед./сек приведена на рис. 3.

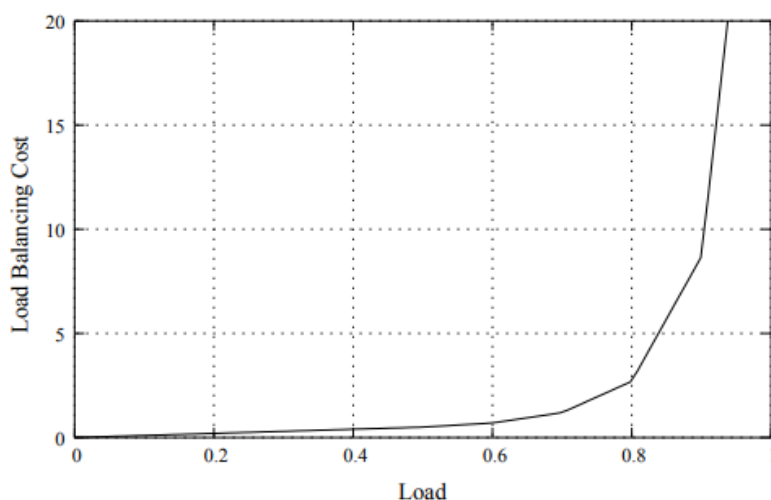


Рис. 3. Функция балансировки нагрузки является кусочно-линейной и выпуклой

Стоимость балансировки нагрузки зависит от общей нагрузки, переносимой на канал m , который обозначается как g_m . Ограничения (7) предполагают, что ссылки не могут быть использованы [4]:

$$g_m = \sum_{t \in T} \sum_{l=1}^{L_t} a_{t,l}^m x_t^l \quad \forall m \in E, \quad (7)$$

$$g_m \leq u_m \quad \forall m \in E. \quad (8)$$

Для канала m с емкостью u_m , коэффициент использования канала равен:

$$\lambda_m = \frac{g_m}{u_m}. \quad (9)$$

Вторая задача минимизирует сумму затрат на балансировку нагрузки:

$$\min \sum_{m \in E} \phi_m. \quad (10)$$

Использование кусочно-линейной возрастающей функции стоимости влечет за собой снижение максимальной загрузки канала в сети. Помимо этой параллельной связи между этими двумя функциями, в данном исследовании также рассматриваются различия в их влиянии на производительность сети. Использование функции балансировки может привести к назначению LSP, которое распределяет нагрузку в сети другим способом от функции, которая минимизирует максимальное использование канала в сети. Это рассуждение проиллюстрировано на рисунке 4.

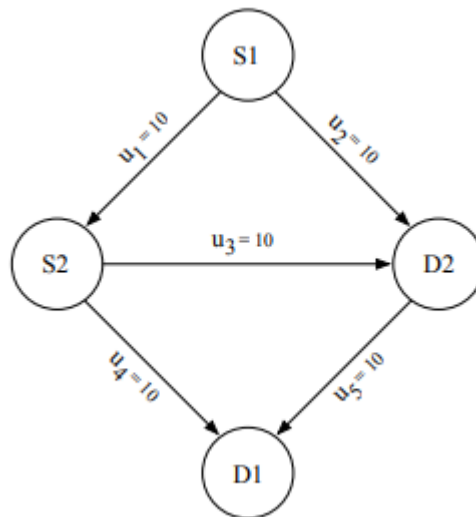


Рис. 4. Пример различий в производительности между минимальной суммой кусочно-линейных возрастающих затрат и минимальной максимальной скоростью использования канала в сети

В этой сети представлены 4 маршрутизатора и 5 однонаправленных звеньев (e_1, \dots, e_5). Есть два запроса трафика, которые имеют требования к пропускной способности 10 ед./сек от S1 к D1, а другой – на 10 ед./сек от S2 до D2. Первый запрос трафика должен быть передан через звено 3, так как это единственный доступный путь

к его назначению. Таким образом, максимальное использование в сети вынужден быть 1.0. Сведение к минимуму максимального использования в качестве цели не будет волновать остальную часть сети, и передача всех требований второго запроса через e1 и e4 может быть его предлагаемым решением. Решение, полученное путем минимизации суммы указанных функций стоимости, предлагает более сбалансированное распределение трафика между путями e1, следующими за e4, и e2, следующими за e5. В решениях, полученных с помощью этой функции, коэффициент использования соответствующих связей будет равен 0,5. Следовательно, высокого использования некоторых звеньев удастся избежать. Общие значения функции балансировки нагрузки для различных распределений трафика между двумя путями приведены в таблице 1 [3].

Таблица 1. Общие значения функции балансировки нагрузки

Нагрузка на путь 1	Нагрузка на путь 2	Стоимость балансировки нагрузки
10.0	0.0	774
9.0	1.0	176
8.0	2.0	58
7.0	3.0	30
4.0	6.0	22
5.0	5.0	20

Поскольку распределение трафика становится более несправедливым, инкремент в общих затратах балансировки нагрузки также увеличивается.

Балансировка нагрузки высокоприоритетного трафика в сети имеет преимущество в том, что она уменьшает его влияние на трафик с более низким приоритетом. Когда сеть работает, трафику с более высокого уровня приоритета дают приоритет в интерфейсах маршрутизатора. Когда скорость трафика с высоким приоритетом на ссылке увеличивает трафик с более низким приоритетом, может пострадать от высоких времен ожидания в очереди. Так, выгодно распределять трафик QoS по сети.

Минимизация количества LSP. Третья цель связана с количеством LSP, используемых запросами трафика. Чем больше запросов трафика разделено по сети, тем больше LSP будет установлено и тем сложнее будет осуществляться управление сетью. Разделение запросов трафика по нескольким путям приведет к увеличению расходов на обмен сообщениями и маркировку. Когда трафик передается по нескольким путям, пакеты могут испытать больше вариантной задержки друг от друга и в результате могут быть переупорядочены. Таким образом, модель направлена на минимизацию количества LSP, назначенных запросам трафика.

Для введения третьей цели в модель введены переменные решения y_t^l , которые равны 1, если p_t^l используется, и 0 в противном случае. Для каждого пути-кандидата в альтернативном наборе каждого запроса трафика в модель добавляется следующее ограничение, чтобы установить значение y_t^l :

$$x_t^l \leq d_t y_t^l \quad \forall t \in T \text{ и } \forall l \in \{1, \dots, L_t\} \quad (11)$$

$$y_t^l \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T \text{ и } \forall l \in \{1, \dots, L_t\} \quad (12)$$

Следовательно, третья целевая функция имеет следующий вид:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{l=1}^{L_t} y_t^l. \quad (13)$$

Выводы. В данной статье рассмотрена функциональная модель туннелирования в сети MPLS, а также проанализированы два способа пересылки пакетов в технологии TE. Определена основная проблема оптимизации сетей данной технологии. Основной задачей является выбор оптимальных LSP для запросов трафика от различных классов обслуживания в сети. Также приведена математическая модель управления транспортной сетью многопротокольной коммутации по меткам. Рассмотрены 3 этапа оптимизации сетей MPLS: минимизация стоимости маршрутизации, балансировка нагрузки и назначение минимального количества LSP. В результате установлены основное преимущество балансировки нагрузки, сформированы функции для поставленных целей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдштейн А. Б. Технология и протоколы MPLS / А. Б. Гольдштейн, Б. С. Гольдштейн. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2014. – 304 с.
2. Fortz В. Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights / В. Fortz, М. Thorup // IEEE INFOCOM : Proceedings. – Tel-Aviv, 2000. – 2. – P. 519–528.
3. Математические модели исследования алгоритмов маршрутизации в сетях передачи данных / М. П. Березко [и др.] // Информационные процессы. – 2001. – Том 1, № 2. – С. 103-125.
4. Voxma О. J. On a Tandem Queueing Model with Identical Service Times at Both Counters, I / О. Voxma // Advances in Applied Probability. – 1979. – Vol. 11, № 3. – P. 616-643.
5. Voxma О. J. On a Tandem Queueing Model with Identical Service Times at Both Counters, II / О. Voxma // Advances in Applied Probability. – 1979. – Vol. 11, № 3. – P. 644-659.
6. Goldstein А. Traffic Engineering in MPLS Tunnels / А. Goldstein, G. Yanovsky // Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking (NEW2AN'04) : Int. Conf., February 02-06, 2004.
7. Олифер В. Г. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы : учеб. пособие / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 3-е изд. – Санкт-Петербург и др. : Питер, 2007. – 958 с. – (Учебник для вузов).
8. Гольдштейн А. Б. Механизм эффективного туннелирования в сети MPLS / А. Б. Гольдштейн // Вестник связи. – 2004. – № 2. – С. 4-16.

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

STUDY OF TUNNELING AND OPTIMIZATION OF TRAFFIC IN THE NETWORKS TECHNOLOGY MPLS TE

W. Zhiltsov, I. Yaremko

The model of packet forwarding in MPLS TE technology and, in particular, the tunneling mechanism in the network is analyzed. The article presents a mathematical model of Multiprotocol label switching transport network management. The mechanisms of minimizing the total cost of routing, load balancing and minimizing the number of LSP in MPLS networks are investigated.

Keywords: mechanism; network; traffic management; quality of service; tunnel; label switching; label distribution Protocol; minimization; balancing.

Жильцов Василий Александрович

студент ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет»,

ДНР, г. Донецк.

E-mail: mewarts@hotmail.com

Zhiltsov Vasily

Student of Donetsk National Technical University,
DPR, Donetsk.

Яремко Игорь Николаевич

кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Автоматика и телекоммуникации» ГОУ
ВПО «Донецкий национальный технический
университет»,

ДНР, г. Донецк.

E-mail: igyaremko@gmail.com

Yaremko Igor

Candidate of Phisico-Mathematical Sciences, Docent,
Associate Professor at Department of «Automation
and Telecommunications» of Donetsk National
Technical University,

DPR, Donetsk.

УДК 681.327.11:537.531

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

© 2019 Я.И. Рушечников, А.В. Яновский, А.С. Жинкина, В.В. Данилов

В работе исследованы электромагнитные излучения средств вычислительной техники. Показано, что восстановить информацию от некоторых средств вычислительной техники можно с помощью общедоступных радиоэлектронных средств. Показано, что излучение дисплеев, содержащих гармоники видеосигналов, охватывает диапазон дециметровых волн

Ключевые слова: электромагнитная совместимость; электромагнитное излучение; наводки электрических сигналов; безопасность электромагнитного излучения.

Введение. Общеизвестно, что работа структурных элементов электронной вычислительной машины сопровождается электромагнитными излучениями [1,2]. Это приводит к появлению наводок (в цепях проводных линий передачи, питания, заземления и т.д.) вследствие электромагнитного воздействия. Электромагнитные излучения, источником которых являются элементы и устройства вычислительной техники (ВТ), как правило, должны отвечать нормам электромагнитной совместимости (ЭМС). Однако, они не являются безопасными с точки зрения сохранения конфиденциальности обрабатываемой информации, откуда требования к ЭМС и защите информации не являются взаимоисключающими [3-6].

Проблема безопасности излучений и наводок в средствах электронной ВТ (ЭВТ) известна со времени появления таковой. Известно, что информацию, обрабатываемую средствами ВТ, можно восстановить путем анализа электромагнитных излучений и наводок, используя соответствующий её прием и декодирование. Применение в средствах ВТ импульсных сигналов прямоугольной формы и высокочастотной коммутации приводит к тому, что в спектре излучений будут компоненты с частотами вплоть до СВЧ.

Хотя энергетический спектр сигналов убывает с ростом частоты, но эффективность излучения при этом увеличивается и уровень излучений может оставаться постоянным до частот несколько гигагерц. Резонансы из-за паразитных связей могут вызывать усиление излучения на некоторых частотах спектра. Целью настоящей работы является исследование физических основ природы вторичных электромагнитных излучений в элементах ЭВТ как носителей информации.

Спектры электромагнитного излучения дисплея. Изображение на экране дисплея формируется в основном так же, как и в испытательном приемнике (телевизионный приемник с незначительными доработками). Оно состоит из светящихся точек на строках. Видеосигнал, необходимый для получения изображения, показан на рис. 1.

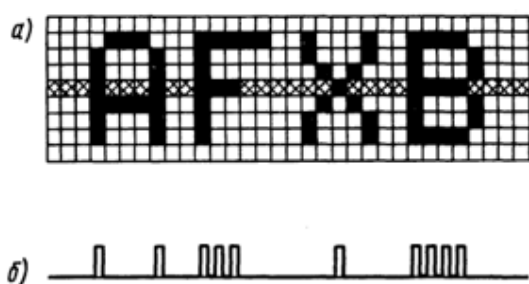


Рис.1. Видеосигнал дисплея:
а) элементы изображения на экране дисплея;
б) сигнал на модуляторе дисплея формирующий изображение

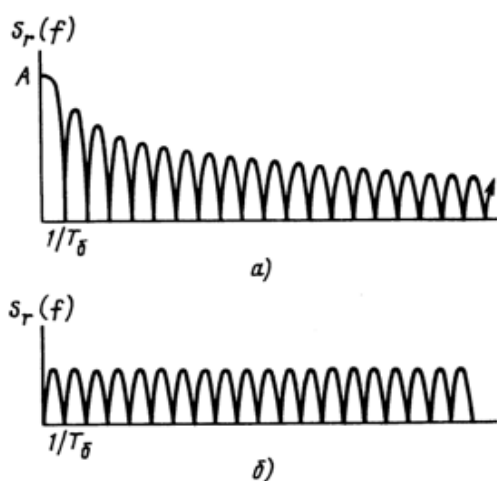


Рис. 2. Энергетические спектры:
а) видеосигнал;
б) электромагнитное излучение при $f < f_2$

Далее, в цепях дисплея присутствует не только видеосигнал, но и тактовые синхроимпульсы. Так как последние повторяются, то энергетический спектр видеосигнала содержит гармоники, интенсивность которых убывает с ростом частоты. В отличие от других сигналов, существующих в дисплее, видеосигнал имеет значительное усиление. Следовательно, именно его излучение является наиболее опасным для дисплея. В первом приближении с увеличением частоты эффективность излучения схем монотонно возрастает со скоростью 20 дБ/декада. Это наблюдается вплоть до частоты в несколько сотен мегагерц, значение частоты зависит от размеров схем обработки видеосигнала. Если предположить, что эта частота ниже f_2 , то энергетический спектр излучения S_r дисплея (рис. 2б) может быть оценен выражением $S_r(f) \sim \sin^2 \pi f T_\delta$, где $f_2 > f > f_1$.

Мощность помех в проводах питания измерялась методом поглощения, а напряженность электрического поля в направлении максимального излучения, с помощью биконической антенны, расположенной на расстоянии 1 м от дисплея при экранированных проводах питания (рис. 3,4).

Видеосигнал является цифровым сигналом, логическая единица которого создает световую точку, а логический нуль препятствует ее появлению. Если на экране дисплея отображается текстовая информация, не имеющая повторов, то цифровой видеосигнал в первом приближении можно считать случайным. Энергетический спектр такого сигнала имеет вид $S_x(f) = A \left(\frac{\sin \pi f T_\delta}{f T_\delta} \right)^2$,

где T_δ - длительность одного бита видео сигнала, A - амплитуда сигнала, которая является функцией числа элементов изображения на экране (рис. 2а).

Видеосигнал имеет конечное время перехода из одного состояния в другое - T_t . Тогда реальный энергетический спектр может быть представлен в форме [2]:

$$S_x(f) = S_x(f) \left[\frac{1}{(\pi f T_t) + 1} \right] = A \left(\frac{\sin \pi f T_\delta}{f T_\delta} \right)^2 \left[\frac{1}{(\pi f T_t) + 1} \right],$$

где последний множитель представляет собой частотную характеристику ФНЧ с граничной частотой $f_2 = 1/(\pi T_t)$. Очевидно, что огибающая энергетического спектра практически постоянна до частоты $f_1 = 1/(\pi T_\delta)$. Начиная с f_1 она убывает со скоростью -20 дБ/декада до f_2 . На частотах более высоких, чем f_2 , скорость убывания составляет -40 дБ/декада .

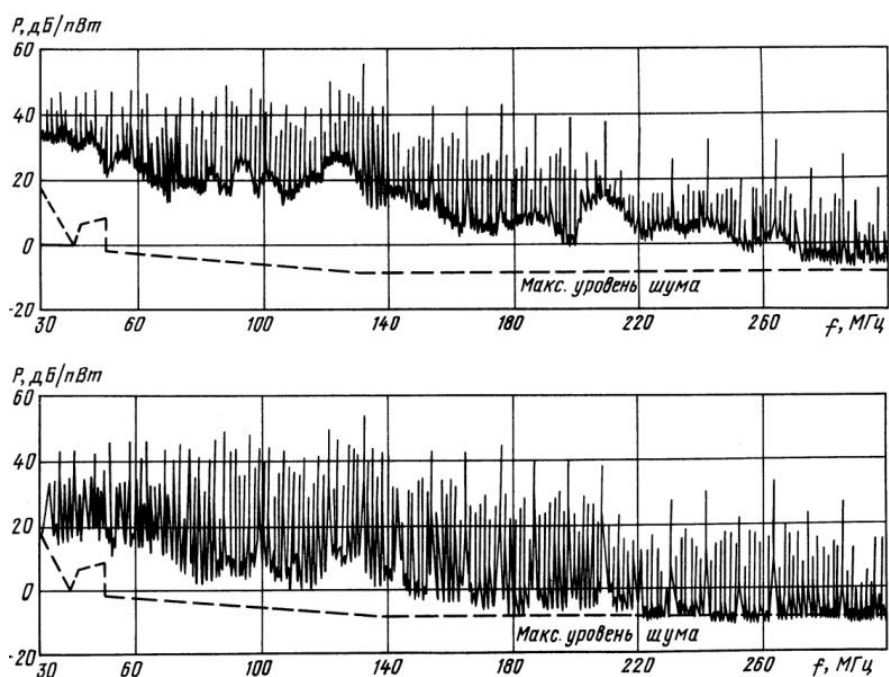


Рис. 3. Мощность наводок P в проводах питания дисплея

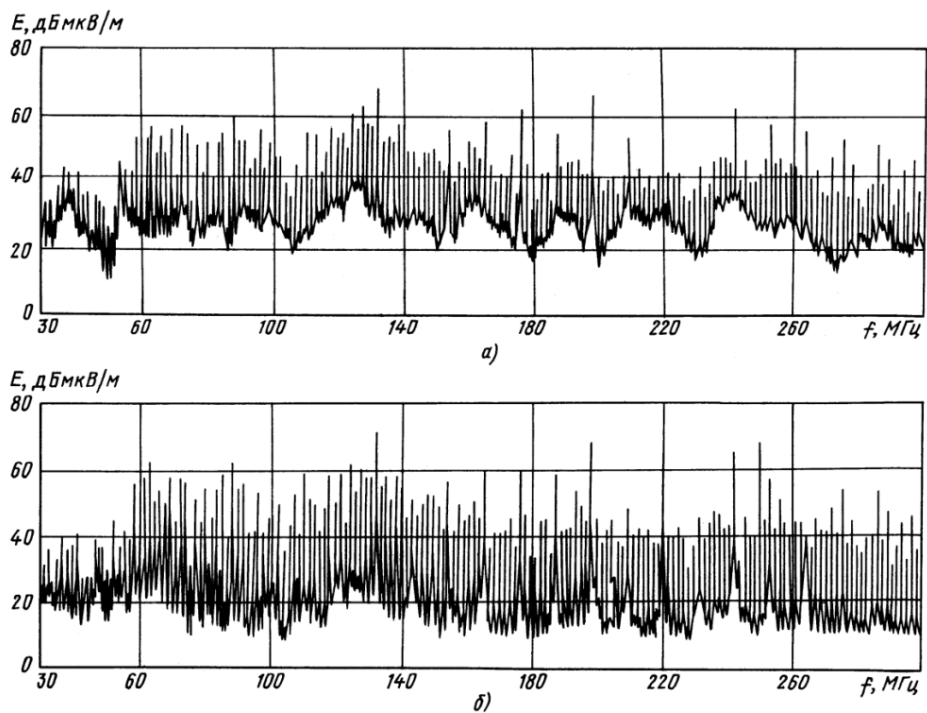


Рис. 4. Напряженность электрического поля E на расстоянии 1 м от дисплея в направлении максимального излучения (поляризация – горизонтальная:
 а) экран заполнен;
 б) на экране ничего нет

Измерения были проведены с помощью анализатора спектра HP 8586A (30...300 МГц, полоса пропускания 10 кГц, пиковое детектирование). Выявлено, что уровень широкополосного излучения дисплея зависит от числа букв на экране; уровень узкополосных составляющих не зависит от заполнения экрана, а определяется системой синхронизации и частотой повторения светящихся точек. Откуда следует, что видеоусилитель является наиболее мощным источником широкополосного излучения, а система синхронизации, узкополосного. Измерения показывают, что широкополосный спектр излучения дисплея не описывается функцией $\sin^2 \pi f T_0$. На некоторых частотах (например, 125 и 210 МГц) имеются резонансы, которые являются причиной увеличения излучения на 15 дБ по сравнению с излучением на соседних частотах. Измерения напряженности электромагнитного поля проводились в диапазоне 30...600 МГц для различных типов дисплеев. Таким образом, излучение дисплеев, содержащих гармоники видеосигналов, охватывает диапазон дециметровых волн.

Восстановление информации с экрана дисплея. Экспериментально, информацию, отображенную на экране дисплея, восстанавливали с помощью испытательного приемника. Он обрабатывает лишь небольшую часть спектра шириной около 8 МГц на частотах в диапазонах метровых и дециметровых волн (обычно ТВ-приемник имеет полосу пропускания 4,5 МГц и демодулятор сигнала с частично подавленной боковой полосой, эквивалентный АМ-детектору с полосой пропускания 8 МГц). Испытательный приемник обрабатывает один «лепесток» энергетического спектра излучения (рис. 2), т. е. частота его настройки совпадает с серединой одного из «лепестков», а полоса пропускания равна его ширине. Временные диаграммы сигнала, обрабатываемого испытательным приемником, изображены на рис. 5.

Усиление низкочастотного сигнала над порогом, определяющим уровень яркости, задается уровнем контрастности. Уровень контрастности определяет крутизну фронтов видеосигнала в приемнике. В отличие от дисплея максимум видеосигнала в испытательном приемнике определяет уровень черного, а минимум определяет уровень белого. Таким образом, изображение на экране приемника будет представлять собой копию изображения на дисплее и состоять из черных букв на белом (или сером) фоне. Если видеосигнал представляет собой длинный импульс, то лучше всего будут излучены в пространство его фронты, которые и дадут при приеме точки (рис. 6).

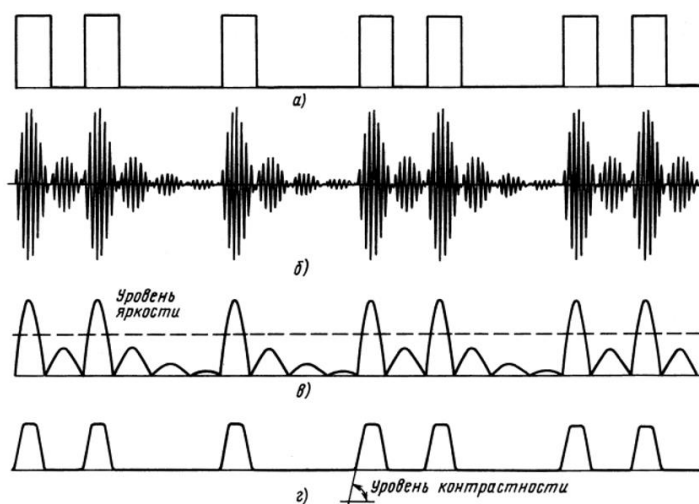


Рис. 5. Временные диаграммы сигнала: а) видеосигнал дисплея; б) сигнал промежуточной частоты;

в) сигнал низкой частоты; г) видеосигнал при оптимальных уровнях яркости и контрастности дисплея

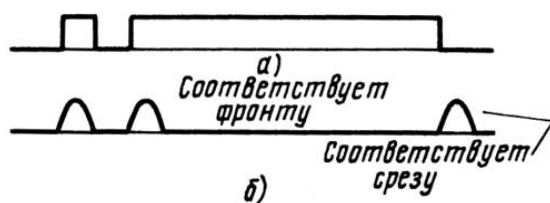


Рис. 6. Уровни видеосигналов:
а) дисплей
б) испытательный приемник

В испытательном приемнике сигнал промежуточной частоты (рис. 5) может быть представлен как $u(t) = a(t)\cos\omega_0 t$, где ω_0 - круговая промежуточная частота. Если принятый узкополосный сигнал является гармоникой частоты повторения светящихся точек изображения, то его частота после УПЧ также будет ω_0 и суммарный принятый сигнал

$u'(t) = a(t)\cos\omega_0 t + b\cos(\omega_0 t + \varphi)$, где b и φ постоянные величины. При $\varphi=0$ и $|a(t)| > b$ сигнал на выходе АМ-детектора приемника будет $e(t) = a(t) + b$.

По сравнению с приемом в отсутствие узкополосного сигнала имеем два преимущества: мощность сигнала увеличилась; динамический диапазон $e(t)$ несколько сузился.

Излучение дисплея, принимаемое испытательным приемником, не содержит информации о синхросигнале. Это сопровождается перемещением изображения на экране приемника в горизонтальном и вертикальном направлениях. Качество приема было улучшено с помощью внешнего генератора синхросигналов, подаваемых на приемник. Такая структура аппаратных средств позволяет восстановить информацию с дисплея почти любого типа. Сигналы на выходе генератора должны иметь частоты 15...20 кГц для синхронизации строк и 40...80 Гц для синхронизации кадров. Известно, что частоты синхронизации строк f_c и кадров f_k связаны между собой $f_c = lf_k$, где l - число строк развертки на экране. Поэтому на практике генерируется сигнал с частотой f_c и делением ее в l раз получается частота f_k .

Повышение безопасности электромагнитного излучения дисплея. В конструкции дисплеев ЭВМ не следует использовать элементы, быстродействие которых больше, чем необходимо, это ограничит верхнюю частоту спектра его излучения. Площадь излучающих участков схемы должна быть как можно меньше. Этого можно добиться располагая выходной проводник на печатной плате как можно ближе к тем, где имеется сигнал. Длина соединительных проводов должна быть минимальной.

Эти меры снижают уровень излучения от печатных плат, но не уменьшают излучение, вызванное электронным лучом кинескопа. Для снижения последнего используется экранирование, причем эффективность экранирования (в децибелах) почти пропорциональна толщине экрана в диапазоне частот от сотен килогерц до нескольких гигагерц. Для уменьшения уровня излучений от дисплея имеется широкий ассортимент экранирующих материалов и средств: экраны с покрытием золотом, проволочные сетки для установки перед экраном дисплея, вентиляционные решетки с ячейками малых размеров, электрические фильтры для уменьшения излучений от кабелей и проводов питания, специальные материалы для соединения различных частей экранирующих конструкций.

Другим способом повышения безопасности излучений является повышение уровня сопровождающего шума. Вследствие жестких норм на ЭМС практически

невозможно снабдить техническое средство генератором шума. Поэтому единственным решением является создание взаимных помех, т. е. размещение в одном месте как можно большего числа одноподобных технических средств, в частности дисплеев. Однако эксперимент показал, что это решение не приводит к увеличению безопасности излучений. Как было указано выше, в спектре излучения дисплеев имеются резонансные частоты, которые не совпадают даже для разных образцов одного и того же типа аппаратуры. Это означает, что информация может быть восстановлена при обработке этих преобладающих участков спектра.

Третьим способом повышения безопасности излучения является создание криптографического дисплея. Основной причиной восстановления информации, отображаемой дисплеем с помощью обычного телевизионного приемника (ТВПр), является сходство в построении изображения двумя этими устройствами. Если изменить последовательность строк изображения на экране дисплея, то с помощью обычного ТВПр нельзя будет восстановить информацию с экрана. Последовательность строк изображения дисплея может меняться с помощью кодового ключа, вводимого в дисплей. Чтобы по принятому сигналу восстановить информацию, нужно знать последовательность строк. Число этих последовательностей составляет $l!$ Для еще большего затруднения восстановления информации кодовый ключ может меняться по случайному закону.

Таким образом, из всех рассмотренных способов повышения безопасности дисплеев с точки зрения их излучения самым дешевым оказывается изменение последовательности строк на экране. Наиболее же универсальным способом является экранирование.

Исследование безопасности излучения дисплея. Для восстановления информации анализ лишь уровня ЭМИ недостаточен, нужно знать еще их структуру. Для дисплеев она соответствует структуре телевизионного сигнала, поэтому в качестве инструмента измерений может использоваться ТВПр. Целью измерений является установление расстояния, на котором информация с экрана дисплея уже не будет воспроизводиться телевизионным приемником. Для проведения измерений использовалась структура аппаратных средств (САС) с диапазоном рабочих частот, более широким по сравнению с обычным ТВПр и повышенной чувствительностью (рис. 7).

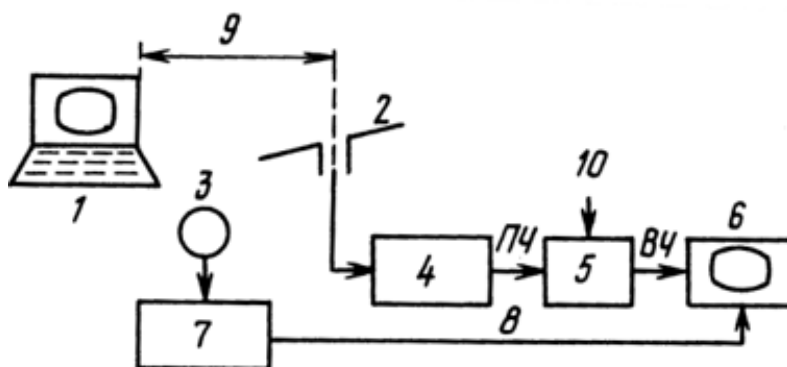


Рис. 7. Структура аппаратных средств измерений: 1 - дисплей; 2 - дипольная антенна; 3 - магнитная рамочная антенна (15...25 кГц); 4 - измерительный приемник; 5 - смеситель; 6 - ТВПр; 7 - формирователь синхросигналов; 8 - сигналы синхронизации (передаются по волоконно-оптической линии); 9 - измеренное расстояние, 10 - сигнал гетеродина

Исследуемый дисплей располагается на высоте 1 м над заземленным металлическим листом, находящимся на полу измерительной площадки. Сигнал от калиброванной антенны подается на вход приемника для измерения в диапазоне 30...1000 МГц. Сигнал ПЧ измерительного приемника перестройкой частоты преобразуется во входной сигнал ТВ-приемника. Два приемника позволяют не только восстанавливать, но и проводить измерения напряженности электрического поля и сравнивать ее значение с качеством восстановления.

Эксперимент показал, что для качественного восстановления текста на экране ТВПр полоса измерительного приемника должна составлять не менее 4 МГц. При полосе 1 МГц текст становится трудночитаемым, но распознается как текст. Если полоса меньше 1 МГц, изображение на экране приемника ТВПр с трудом распознается как текст.

В отличие от ситуации реального извлечения информации из излучения при измерениях имеющийся в наличии дисплей позволяет измерять синхросигналы. Строчный синхросигнал получают непосредственно от дисплея, как правило, за счет магнитного поля строчного трансформатора. С помощью магнитной антенны и последующего фильтра выделяется синусоида с частотой 15...20 кГц, которая имеет значительную фазовую нестабильность. Для устранения нестабильности требуется фазовая автоподстройка с большой постоянной времени. Схема формирования импульсов превращает синусоиду в синхроимпульсы строк, последние делением частоты повторения в l раз превращаются в синхроимпульсы кадров. Синхроимпульсы поступают на ТВПр по волоконно-оптическому кабелю, чтобы предотвратить их влияние на поле излучения дисплея.

Измерения показали (рис. 7), что, несмотря на то, что все исследуемые дисплеи удовлетворяют нормам на электромагнитные помехи, с расстояния 50 м можно было получить хорошее изображение информации с экрана дисплея на экране ТВПр, если дисплей имел пластмассовый корпус. Если корпус металлический, то это расстояние уменьшалось до 10 м. В измерениях использовалась дипольная антенна. Замена которой на направленную антенну (трехэлементная, типа «волновой канал») дает выигрыш порядка 10 дБ. В этом случае указанные расстояния составляют более 300 м, для дисплея в пластмассовом корпусе, 150 м для дисплея в металлическом корпусе.

Безопасность электромагнитного излучения кабелей передачи данных. Как правило, причиной излучения кабелей является плохое состояние соединителей, направленных ответвителей и т. п. Теоретически, если нет дефектов в экране (оплетке) кабеля, соединителях и других компонентах кабельной сети, эффективность экранирования кабеля составляет более 100 дБ. Этого более чем достаточно для предотвращения любого излучения от кабеля, которое можно зарегистрировать. При этом предполагается максимальный уровень сигнала в кабеле не более 100 мВ, а минимальный сигнал на поверхности кабеля должен быть более 1 мкВ (уровень необходимый для регистрации приемником).

Существуют приемники, которые могут регистрировать и более слабые сигналы, но они обычно узкополосные и не годятся для приема широкополосных сигналов передачи данных. Тепловой шум на входе приемника ограничивает прием сигнала. Значения шума широкополосного кабеля приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения шума широкополосного кабеля

Скорость передачи данных, Мбит/с	Требуемая полоса пропускания, МГц	Среднеквадратическое значение шума в полосе приемника, мкВ
5	6	2,68
0,1	0,3	0,6
0,01	0,03	0,2

Из данных таблицы 1 следует, что среднеквадратическое значение теплового шума на поверхности кабеля выше 1 мкВ для кабеля с высокой скоростью передачи данных (отношение сигнал-шум на входе приемника меньше 1) и ниже этого значения для кабеля с малой скоростью передачи данных (отношение сигнал-шум больше 1). Это означает, что в последнем случае можно восстановить данные по излучению кабеля. С увеличением расстояния до кабеля эта возможность уменьшается. Затухание излучения кабеля равно $20\lg(4\pi d / \lambda)$, где d - расстояние до кабеля, λ - длина волны излучения кабеля. Таким образом, при исправном кабеле восстановить информацию по излучению очень трудно. Однако на практике кабели не всегда полностью экранированы. Неисправные или покрытые коррозией соединители могут быть причиной значительных излучений. Обнаружители утечки сигналов, часто используемые персоналом, обслуживающим кабельные системы телевидения, могут быть использованы для поиска мест излучений в широкополосных кабелях. Эти приемники очень узкополосны (полоса менее 1 кГц), не перестраиваются и могут зарегистрировать напряженности поля 0,1 мкВ на поверхности кабеля, что позволило обнаружить и зарегистрировать сигнал уровнем 1 мкВ на расстоянии 3 м от кабеля.

Установлено экспериментально, что электрические кабели могут излучать и кроме этого принимать радиоволны. В этом случае мешающие сигналы увеличивают уязвимость данных и снижают скорость их передачи. Указанные недостатки электрических кабелей полностью устраняются при замене электрических кабелей волоконно-оптическими. Однако это требует использования электрооптических и оптико-электрических преобразователей с обеих сторон волоконно-оптического кабеля, используемого для передачи данных в двух направлениях. Переход на волоконно-оптические кабели имеет смысл только при безопасных электромагнитных излучениях от этих преобразователей.

Наводки между проводами и кабелями. Методы моделирования практически

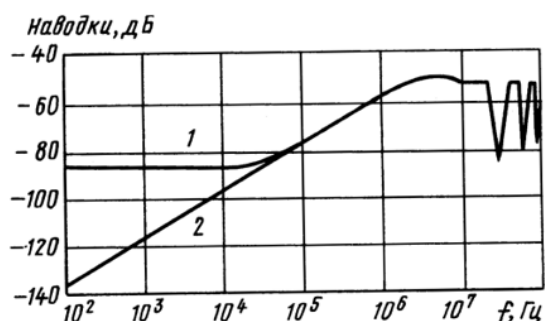


Рис. 8. Наводки на неэкранированный провод от другого неэкранированного провода при неидеальной «земле» (кривая 1) и идеальной (кривая 2)

невозможно применять при определении безопасного уровня излучений.

Необходимы экспериментальные измерения. Тем не менее, известны решения задачи и они в основном относятся к наводкам [2, 4]. Результаты решения задачи о наводках с одного неэкранированного провода на другой, параллельный ему провод той же длины, расположенных над «землей» (провода с двух концов нагружены на одинаковые сопротивления), представлены на рис. 8.

Предполагалось, что создаваемый ток наводок в пассивном проводе на одинаковых сопротивлениях нагрузки с двух его концов будет давать одинаковое напряжение на нагрузках. Поэтому результаты расчета сводились лишь в одну таблицу для дальнего (по отношению к подключенному в активном проводе генератору) конца пассивного провода. Различие в выходных напряжениях на ближнем и дальнем концах пассивного провода составило почти 40 дБ. Задача решена также в предположении, что «земля» не является идеальным проводником (рис. 8). Таким образом, пренебрегая сопротивлением «земли», можно совершить значительную ошибку, на низких частотах она составляет 40 дБ.

Результаты исследования эффективности экранирования кабелей представлены на рис. 9. Распространено качество экрана экранированных кабелей описывать в терминах переходного сопротивления, однако часто возникает необходимость пересчета в эффективность экранирования. Для ее получения используется метод деления переходного сопротивления на сопротивление нагрузки. Тем не менее замечено, что при различных вариантах заземления результирующая эффективность экранирования заметно меняется (рис. 9).

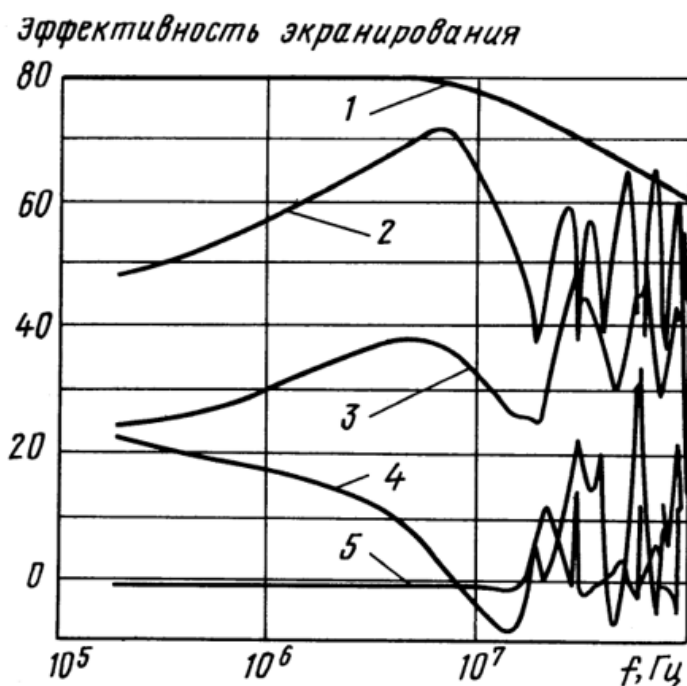


Рис. 9. Эффективность экранирования коаксиальных кабелей: 1 - расчет по значению переходного сопротивления; 2 - заземлены оба конца; 3 - заземлен ближний конец; 4 - заземлен дальний конец; 5 - заземление отсутствует

Возможности расчетной модели прогнозирования наводок, использованной в приведенных примерах, проверялись экспериментально. Проводились расчеты и эксперименты, при которых оценивались наводки с экранированного кабеля на экранированный и с неэкранированного провода на экранированный кабель. Для заземления экранов кабелей использовались отрезки провода длиной 8 см, к концам кабелей подключались резисторы с сопротивлением 1000 Ом. На рис. 10 приведен один из примеров, подтверждающий хорошее совпадение теоретических результатов и эксперимента.

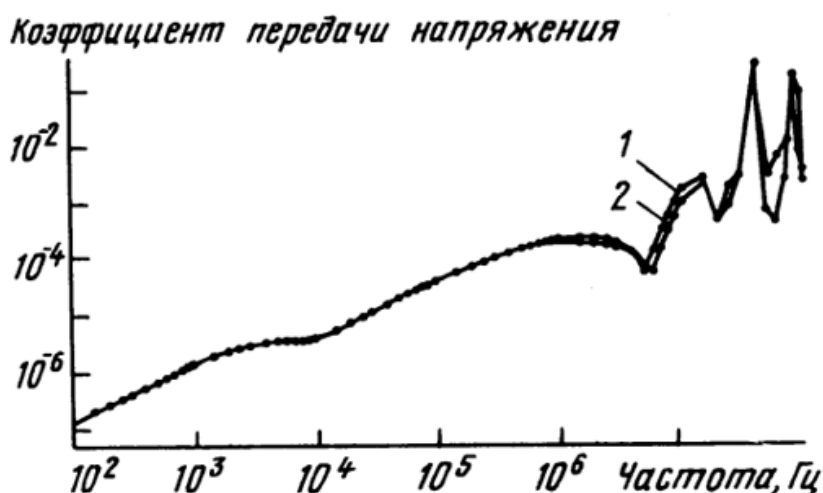


Рис. 10. Наводки на дальний конец экранированного кабеля с другого экранированного кабеля:
1- расчетная кривая; 2 -- экспериментальная кривая

Заключение. В результате проведенных экспериментальных исследований:

- установлено, излучение дисплеев, содержит гармоники видеосигналов которые практически охватывают диапазон дециметровых волн;

- установлено, что излучение дисплея, принимаемое испытательным приемником, не содержит информации о синхросигнале. Это сопровождается усложнением процедуры приема и необходимостью использования внешнего генератора синхросигналов. Такая структура аппаратных средств позволяет восстановить информацию с дисплея почти любого типа. Сигналы на выходе генератора должны иметь частоты 15...20 кГц для синхронизации строк и 40...80 Гц для синхронизации кадров;

- установлены мощность наводок в проводах питания дисплея и напряженность электрического поля на определенном расстоянии от дисплея в направлении максимального излучения (рис.3,4);

- предложена структура аппаратных средств для исследования дальности распространения излучения дисплея, несущего информацию об изображении на экране (рис.7);

- установлена частотная зависимость наводок на неэкранированный провод от другого неэкранированного провода при неидеальной и идеальной «земле» (рис. 8);

- установлена частотная зависимость эффективности экранирования коаксиальных кабелей (рис. 9).

Сделано предположение, что волоконно-оптические кабели полностью устраняют недостатки электрических кабелей, связанные с излучением. Однако замена одного кабеля на другой связана с введением электрооптических и оптико-электрических преобразователей, на которые и перекладывается проблема обеспечения безопасности излучений в волоконно-оптических кабелях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никольский В.Д. Электродинамика и распространение радиоволн/ В.Д.Никольский. - Москва: Наука, 1973.
2. Маслов М.Ю. Численный анализ электромагнитного поля монитора с электронно-лучевой трубкой/ М.Ю. Маслов, С.В. Ситникова, Ю.М. Сподобаев //Вестник СОНИИР.-2005.-№1.-С. 44-47.

3. Лыньков Л.М. Защита от побочного электромагнитного излучения персонального компьютера/ Л.М. Лыньков, Т.В. Борботько, А.А. Казака // Доклады БГУИР. – 2008.-№5(35).-С. 29-34.
4. ГОСТ Р 50948-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности [Электронный ресурс].- Москва: Стандартинформ,2008.-Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200028904>.- Назв. с экрана.
4. ГОСТ Р 50949-01. Средства отображения информации индивидуального пользования. Методы измерений и оценки эргономических параметров и параметров безопасности [Электронный ресурс].- Москва: Издательство стандартов,2002.-Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-50949-2001>.- Назв. с экрана.
6. ГОСТ Р 50923-96. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения [Электронный ресурс].- Москва: Стандартинформ,2008.- Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-50923-96>.- Назв. с экрана

Поступила в редакцию 06.06.2019 г.

ELECTROMAGNETIC RADIATION OF ELEMENTS OF ELECTRONIC COMPUTER ENGINEERING

Y. Rushechnikov, A. Yanovsky, A. Zhinkina, V. Danilov

The work investigated the electromagnetic radiation of computer technology. It is shown that it is possible to recover information from some computer facilities using generally available radio-electronic means. It is shown that the radiation of displays containing harmonics of video signals covers the range of decimeter waves

Keywords: electromagnetic compatibility; electromagnetic radiation; interference of electrical signals; electromagnetic radiation safety.

Рущечников Ярослав Иванович

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

Rushechnikov Yaroslav

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

Яновский Александр Вадимович

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

Yanovsky Alexander

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

Жинкина Анастасия Сергеевна

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

Zhinkina Anastasiya

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

Данилов Владимир Васильевич

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

Danilov Vladimir

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

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.67

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ. ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

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

В работе рассмотрены основы физического описания процессов преобразования и переноса информации многомерными сигналами. Показано, что в области Фраунгофера двумерное преобразование Фурье сопровождается дифракцией электромагнитных волн. Предложено математическое описание дифракции на прямоугольном и круглом отверстии.

Ключевые слова: оптические информационные технологии, преобразования Фурье и Френеля, колебательный процесс, двумерное преобразование Фурье, дифракция.

Введение. Интенсивно развивающиеся сегодня оптические информационные технологии представляют новое научное направление, которое возникло на стыке радиоэлектроники, оптики и когерентной оптоэлектроники [1-3]. Носителем информации является электромагнитное поле оптического диапазона ($10^{14} - 10^{16}$ Гц). В работах [1-7] показаны преимущества оптических информационных технологий, основанных на физических явлениях когерентности электромагнитного поля волн как носителя информации, перед возможностями электрических, проведен анализ известных явлений физической оптики, потенциально пригодных для создания элементной базы оптических вычислителей, в частности, неуправляемых устройств ввода информации в оптические вычислители (модуляторы), показана потребность знания физических основ их функционирования, в частности, выяснения математических описаний сигналов, часто используемых для показа процессов оптической обработки. Это интегральные и двумерные преобразования Френеля и Фурье.

Основная часть. Сигнал, распространяясь по оптической системе обработки, взаимодействует с элементами ее тракта, в результате чего происходит изменение его спектрального состава, а соответственно и информации. Преобразование Фурье является отличным «инструментом» позволяющим исследовать такие изменения. Сигналы, представляющие колебательный процесс описываются различного рода (по степени сложности) функциями. Математическую операцию, преобразование Фурье, можно реализовать в виде ряда Фурье. Если функция удовлетворяет условиям Дирихле [8-13] а период ее можно представить в виде $f(t) = f(t - nT)$, где T - период, n - целое число, и устремить ее к бесконечности, тогда ее можно разложить в ряд Фурье:

$f(t) = (0,5/\pi) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_k \exp(ik\Omega t)$. Комплексные амплитуды гармонических составляющих

пропорциональны A_k , равны: $A_k = \Omega \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \exp(-ik\Omega t) dt$, $\Omega = 2\pi/T$. Переписав

предыдущее выражение в форме: $A_k(2\pi)^{-1} = T^{-1} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \exp(-ik\Omega t) dt$, видно, что k -я комплексная амплитуда есть среднее значение функции $f(t)$ за период T с весом $\exp(-ik\Omega t)$. Совокупность гармонических составляющих, возникающих при математическом разложении функции $f(t)$, называют её спектром. Каждая гармоническая составляющая полностью определяется комплексной амплитудой $A_k/(2\pi)$ и частотой $k\Omega$. Совокупность частот гармонических составляющих представляет частотный спектр функции $f(t)$. Так как амплитуды, величины комплексные: $A_k/(2\pi) = (0,5/\pi)|A_k| \exp(i\varphi_k)$, то для полной характеристики сигнала (изображения) нужно знать еще амплитудный и фазовый спектры. Таким образом, информация переносимая колебательным (волновым) процессом полностью описывается его частотным, фазовым и амплитудным спектром.

Когда период колебаний T стремится к бесконечности, частота Ω уменьшается до нуля, спектральные линии сближаются, спектр из дискретного переходит в сплошной. Обозначим $k\Omega = \omega$ (текущая частота) и рассмотрим предел $\lim_{T \rightarrow \infty} (A_k / \Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-i\omega t) dt = G(\omega)$, который называют спектральной плотностью (спектральной функцией). При ограничении интеграла, все коэффициенты A_k будут стремиться к нулю. При $T \rightarrow \infty$, амплитуды гармонических составляющих, будут равны нулю. Зная $G(\omega)$, можно найти $f(t)$, используя комплексную форму ряда Фурье:

$$f(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} (2\pi)^{-1} \sum_{k=-\infty}^{\infty} (A_k / \Omega) \exp(i\omega t) \Omega \quad \text{или} \quad f(t) = (2\pi)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \exp(i\omega t) d\omega.$$

Выражения для $G(\omega)$ и $f(t)$, представляют математическое описание прямого и обратного преобразования Фурье.

Преобразование Френеля. Преобразование Френеля в радиоэлектронике [11] вводится в следующем виде: $\Phi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) z(x - \xi) d\xi$, $f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\xi) z^*(x - \xi) d\xi$, где $f(x)$ - преобразуемая функция, $\Phi(x)$ - изображение ее по Френелю. Функция Гаусса с мнимым показателем $z(x) = e^{-ix^2/2}$, является ядром приведенных интегральных преобразований. Следовательно, если задана функция $f(x)$, то ее образ по Френелю, определяется по формуле:

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi) \exp[-i(x - \xi)^2 / 2] d\xi. \quad (1)$$

Зная образ, функция определяется из соотношения

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\xi) \exp[i(x - \xi)^2 / 2] d\xi. \quad (2)$$

Докажем справедливость выражений. Определим $\Phi(x)$ из соотношения (1). Но дополнительно необходимо доказать, что верно выражение (2). Используем интеграл $I = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\xi) \exp[i(x - \xi)^2 / 2] d\xi$. Докажем, что он равен $2\pi f(x)$. Воспользовавшись 1) получаем $\Phi(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\eta) \exp[-i(x - \eta)^2 / 2] d\eta$, поэтому:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\eta) \exp[-i(x-\eta)^2/2] \exp[i(x-\xi)^2/2] d\eta d\xi$$

Предлагается изменить порядок интегрирования:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} f(\eta) \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\frac{1}{2}(\xi^2-2\xi\eta+\eta^2)+i\frac{1}{2}(x^2-2x\xi+\xi^2)} d\xi d\eta = \int_{-\infty}^{\infty} f(\eta) e^{-i\frac{1}{2}(\eta^2-x^2)} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\xi(\eta-x)} d\xi d\eta.$$

Если интегральное представление δ -функции будет $\delta(t) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} d\omega$, то

при $t = \eta - x$; $I = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} f(\eta) e^{-i\frac{1}{2}(\eta^2-x^2)} \delta(\eta-x) d\eta = 2\pi f(x)$, т.е. $f(x) = \frac{1}{2\pi} I$. Таким образом по образу функции нашли саму функцию.

Преобразование Френеля используется в оптических информационных технологиях так же часто, как и преобразование Фурье. Использование обоих интегральных преобразований обусловлено тем, что пространство изменяет распространяющиеся в нем волны согласно этими преобразованиями. Конфигурация поля в плоскости xoy может быть реализована путем освещения транспаранта с записанным на нем сигналом (изображением), плоской электромагнитной волной. Определим конфигурацию поля по другую сторону пластинки. Справа от транспаранта поле условно разделим на две области, область Френеля и область Фраунгофера. Для определения структуры поля в зоне Френеля, применим преобразование Френеля, в области Фраунгофера, применим преобразование Фурье.

Предположим, что поле в плоскости xoy задано в виде произведения функции x на функцию y : $A(x)B(y)$. Поле в произвольной точке найдем согласно выражению:

$$u = \frac{k}{2\pi iz} e^{ikz} \left[\int_{-\infty}^{\infty} A(\xi) \exp \frac{ik}{2z} (x-\xi)^2 d\xi \right] \left[\int_{-\infty}^{\infty} B(\xi) \exp \frac{ik}{2z} (y-\xi)^2 d\xi \right].$$

Интеграл вида $\int_{-\infty}^{\infty} A(\xi) \exp \frac{ik}{2z} (x-\xi)^2 d\xi$ - преобразование Френеля функции $A(x)$, второй интеграл $\int_{-\infty}^{\infty} B(\xi) \exp \frac{ik}{2z} (y-\xi)^2 d\xi$, то же преобразование, только функции $B(y)$.

Значимость лазера в оптических информационных технологиях, как источника очень близкого по своим свойствам к когерентному излучению, показана в [15]. Резонатор лазера состоит из двух зеркал. Одно зеркало плоское, второе - сферическое, не прозрачное. Сферическое зеркало обеспечивает более устойчивую работу, а плоское, полупрозрачное, для получения волны с плоским фронтом. В первом приближении [2,15], интенсивность волны у плоского зеркала, при работе лазера на основной моде колебаний TEM_{00p} , изменяется по закону Гаусса $A(x)B(y) = \exp -\frac{r^2}{a_0^2}$, где r - расстояние от центра зеркала. Поле возникающей плоской волны - расходящееся, обладает круговой симметрией [14,15]. Учитывая что $r^2 = x^2 + y^2$, то $A = \exp -\frac{x^2}{a_0^2}$,

$B = \exp - \frac{y^2}{a_0^2}$. На длине $r = a_0$, где a_0 - радиус пучка в плоскости $z = 0$, интенсивность уменьшается в e раз [10]. Воспользовавшись преобразованием Френеля, поле в произвольной точке изменяется по закону $u = \frac{\exp ikz}{1 + i \frac{2z}{ka_0^2}} \exp \frac{ikr^2}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{2i}{ka^2} \right)$, где

$R = z \left(1 + \frac{k^2 a_0^4}{4z^2} \right)$ - радиус волнового фронта; $a = a_0 \sqrt{1 + \frac{4z^2}{k^2 a_0^4}}$ - радиус пучка. В

случае $z = 0$ радиус волнового фронта $R = \infty$ - плоская волна, радиус пучка $a = a_0$.

Амплитуда пучка $|u| = \frac{a}{a_0} \exp - \frac{r^2}{a^2}$ имеет гауссово распределение в поперечном

сечении. При $r^2 = a^2$ она уменьшается в e раз. Образующая пучка, гипербола и определяется из условия $r^2 = a^2$. При больших $a \approx a_0 \frac{2z}{ka_0}$, угол расходимости

определяется выражением $\theta = \frac{a}{z} = \frac{2}{ka_0} = \frac{\lambda}{\pi a_0}$, а радиус волнового фронта $R \approx z$. Из

рассмотрения, становится понятным, что одномодовом режиме лазер излучает сферическую волну, распределение интенсивности которой определяется законом Гаусса.

Двумерное преобразование Фурье. Для функций двух переменных $f(x, y)$ применяют двумерное преобразование Фурье которое можно представить в виде [13]:

$$G(\omega_1, \omega_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp(-i\omega_1 x - i\omega_2 y) dx dy,$$

$$f(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega_1, \omega_2) \exp(-i\omega_1 x - i\omega_2 y) d\omega_1 d\omega_2$$

Спектральная плотность является функцией двух частот ω_1 и ω_2 . В оптических информационных технологиях, двумерное преобразование Фурье, наиболее часто используемый математический аппарат [10,12,14]. Обычно, функция $f(x, y)$, математическое описание поля в плоскости какого-либо оптико-электронного либо оптического прибора (диафрагмы, линзы, зеркала), а $G(\omega_1, \omega_2)$ поле в другой плоскости пространства. Если $f(x, y) = f_1(x)f_2(y)$, то:

$$G(\omega_1, \omega_2) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x) \exp(-i\omega_1 x) dx \int_{-\infty}^{\infty} f_2(y) \exp(-i\omega_2 y) dy,$$

и обратно, если $G = G_1 G_2$, то $f = f_1 f_2$ т.е. произведение двух одномерных преобразований. При вводе двух векторов \vec{r} с проекциями x и y , а также $\vec{\Omega}$ с проекциями ω_1 и ω_2 , и нахождении их скалярного произведения $\vec{\Omega} \vec{r} = \omega_1 x + \omega_2 y$ можно записать:

$$G(\vec{\Omega}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\vec{r}) \exp(-i\vec{\Omega}\vec{r}) d\vec{r} \quad f(\vec{r}) = (1/2\pi) \int_{-\infty}^{\infty} G(\vec{\Omega}) \exp(i\vec{\Omega}\vec{r}) d\vec{\Omega}$$

В области Фраунгофера двумерное преобразование Фурье определяет дифракцию электромагнитных волн. Пусть $f(x_1, y_1)$, поле в плоскости $z=0$. Покажем, интенсивность поля в плоскости $z=L$ пропорциональна $G(\omega_1, \omega_2)$, где $\omega_1 = kx_2/L$, $\omega_2 = ky_2/L$.

Дифракция на прямоугольной щели. Сделаем допущение, что амплитуда поля всюду равна нулю, кроме как на щели, где она постоянна и равна A . В этом случае:

$$\begin{aligned} G &= \int_{-a}^a \int_{-d}^d A \exp(-i\omega_1 x - i\omega_2 y) dx dy = A \int_{-a}^a \exp(-i\omega_1 x) dx \int_{-d}^d \exp(-i\omega_2 y) dy = \\ &= A[(e^{-i\omega_1 a} - e^{i\omega_1 a})/(-i\omega_1)] \cdot [(e^{-i\omega_2 d} - e^{i\omega_2 d})/(-i\omega_2)] = \\ &= 4ad[(\sin \omega_1 a)/(\omega_1 a)] \cdot [(\sin \omega_2 d)/(\omega_2 d)]. \end{aligned}$$

На расстоянии L от щели поле пропорционально G . При установке в плоскости $z=L$ фоторегистрирующей пластинки, она зафиксирует результат пропорциональный $|G|^2$, $G^2 = \frac{\sin^2(kax_2)/L}{kax_2/L} \cdot \frac{\sin^2(kdy_2)/L}{kdy_2/L}$, где, $x_2 = \pi L/(ka)$ и $y_2 = \pi L/(kd)$ - первые нули этих функций определяют ширину лепестка вдоль осей x_2 и y_2 . Так, вдоль оси x_2 ее значение $\lambda L/a = 2\pi L/(ka)$.

В общем случае $f(x, y) = \sum \varphi_k(x) \psi_k(y)$. Так как функция линейна, двумерное ПФ принимает вид $G(\omega_1, \omega_2) = \sum \Phi_k(\omega_1) \Psi_k(\omega_2)$, где $\Phi_k(\omega_1)$ - одномерное преобразование Фурье функции $\varphi_k(x)$; $\Psi_k(\omega_2)$ - одномерное ПФ функции $\psi_k(y)$.

В полярной системе координат r и φ , находят из условий $x = r \cos \varphi$; $y = r \sin \varphi$, $dxdy = r dr d\varphi$, $f(x, y) = f(r \cos \varphi, r \sin \varphi) \rightarrow f(\varphi, r)$, показатель экспоненты равен $\omega_1 x + \omega_2 y = r(\omega_1 \cos \varphi + \omega_2 \sin \varphi) = r \sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2} \cos(\varphi - \psi)$, где

$$\cos \psi = \frac{\omega_1}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}}, \quad \sin \psi = \frac{\omega_2}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2}}. \quad \text{При условии что } \Omega^2 = \omega_1^2 + \omega_2^2, \text{ тогда}$$

$$\omega_1 x + \omega_2 y = r \Omega \cos(\varphi - \psi), \text{ а } G(\omega_1, \omega_2) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} f(r, \varphi) \exp[ir\Omega \cos(\varphi - \psi)] r dr d\varphi.$$

Вследствие того что $f(\varphi, r)$ - периодическая функция относительно переменной φ , с периодом $T = 2\pi$, то ее можно представить в виде ряда Фурье

$$f(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_k(r) \exp(ik\omega\varphi). \quad \text{Так как } \omega = 2\pi/T = 1, \text{ то } f(r, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_k(r) \exp(ik\varphi).$$

Тогда $G(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \int_0^\infty A_k(r) r \int_0^{2\pi} \exp[ik\varphi - ir\Omega \cos(\varphi - \psi)] d\varphi dr$. Преобразуем переменные

$$\varphi - \psi = \pi/2 - \theta, \quad d\varphi = -d\theta, \quad \varphi = \Psi + \frac{\pi}{2} - \theta, \quad \text{и рассмотрим внутренний интеграл}$$

$G(\omega_1, \omega_2)$.

Получаем
$$- \int_{\frac{\pi}{2}+\psi}^{\frac{\pi}{2}+\psi-2\pi} \exp(ik\psi - ik\frac{\pi}{2} - ir\Omega \sin\theta - ik\theta) d\theta = 2\pi i^k \exp(ik\psi) J_k(r\Omega) (-1)^k,$$

где $J_k(x)$ - функция Бесселя. Отсюда следует, что

$$G(\omega_1, \omega_2) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} A_k(r) r i^k \exp(ik\psi) J_k(r\Omega) (-1)^k dr, \text{ или } G(\omega_1, \omega_2) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k \exp(ik\psi) \int_0^{\infty} r J_k(r\Omega) A_k(r) dr.$$

Компонент $\int_0^{\infty} r J_k(r\Omega) A_k(r) dr$, обозначим как $B_k(\Omega)$, который является функцией

Ω . Это интегральное преобразованием Фурье – Бесселя [1, 10]. Следовательно,

выражение $G = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (-1)^k B_k e(ik\psi)$, представляет собой математическую операцию

разложения спектральной плотности G в ряд Фурье. Коэффициентами разложения являются $2\pi(-1)^k B_k(\Omega)$. Обратное преобразование Фурье - Бесселя имеет такой же

вид, как и прямое. Если $B_k(\Omega) = \int_0^{\infty} r J_k(r\Omega) A_k(r) dr$ - прямое преобразование Фурье, то

обратное будет выглядеть как $A_k(r) = \int_0^{\infty} \Omega J_k(r\Omega) B_k(\Omega) d\Omega$.

Если поле в плоскости $z = 0$ обладает круговой симметрией, то $f(r, \varphi)$ не зависит от φ и при ее разложении в ряд Фурье получим только один член (при $k = 0$)

$$f(r, \varphi) = (1/2\pi) A_0(r). \text{ Спектральная плотность } G(\omega_1, \omega_2) = \int_0^{\infty} r J_0(r\Omega) A_0(r) dr,$$

$$\text{или } G(\omega_1, \omega_2) = 2\pi \int_0^{\infty} r J_0(r\Omega) f(r) dr.$$

Дифракции на круглом отверстии. Примем, что $f(r) = 1$ в круге $r \leq r_0$ и $f(r) = 0$ нулю вне круга. В этом случае

$$G(\Omega) = 2\pi \int_0^{r_2} r J_0(r\Omega) dr = 2\pi r_0^2 \int_0^1 \xi J_0(r_0\Omega\xi) d\xi = 2\pi r_0^2 \frac{J_1(r_0\Omega)}{r_0\Omega}.$$

Полагая $A_0(r) = \delta(r - r_0)$, находим $G(\Omega) = \pi r_0 (r_0\Omega) = r_0 J_0(r \frac{kr_0}{L})$. Отношение r/L при малости угла определим в виде $r/L = 0$. Первый корень функции Бесселя $\theta_1 k r_0 = 2,4$, откуда $\theta_1 = \frac{2,4\lambda}{2\pi r_0} = 1,2 \frac{\lambda}{\pi r_0}$.

Пространство при прохождении сферической волны преобразует ее. Известно [6,10], что точечный источник, помещенный в начало координат пространства, создает

сферическую волну вида $u = \frac{\exp(ik\sqrt{x^2 + y^2 + z^2})}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$, в плоскости $z = z_0$ поле изменяется

по закону $u = \frac{\exp(ik\sqrt{r^2 + z_0^2})}{\sqrt{r^2 + z_0^2}}$. В области Фраунгофера поле пропорционально

спектральной плотности сигнала [10, 14]. При обладании полем круговой симметрии можно воспользоваться преобразованием Фурье - Бесселя:

$G(\Omega) = 2\pi \int_0^\infty \frac{\exp(ik\sqrt{r^2 + z_0^2})}{\sqrt{r^2 + z_0^2}} r J_0(\Omega r) dr$. Если используем вместо переменной r новую,

$v = \frac{\sqrt{r^2 + z_0^2}}{z_0}$, получим $r = z_0 \sqrt{v^2 - 1}$, $z_0^2 v dv = r dr$, а тогда,

$$G(\omega) = 2\pi \int_0^\infty \frac{\exp(ikz_0 v)}{z_0 v} z_0 v J_0(\Omega z_0 \sqrt{v^2 - 1}) dv = 2\pi z_0 \int_0^\infty \exp(ikz_0 v) J_0(\Omega z_0 \sqrt{v^2 - 1}) dv.$$

Используя [17], находим формулу $\int_1^\infty e^{-\alpha x} J_0(\beta \sqrt{x^2 - 1}) dx = \frac{\exp(-\sqrt{\alpha^2 + \beta^2})}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}$,

применение которой дает следующий результат $G(\omega) = 2\pi i \frac{\exp(iz_0 \sqrt{k^2 - \Omega^2})}{\sqrt{k^2 - \Omega^2}}$, или,

$$\text{учитывая, что } \Omega = \frac{kr}{L}, G(\Omega) = 2\pi i \frac{\exp(iz_0 \sqrt{k^2 - \frac{k^2 r^2}{L^2}})}{\sqrt{k^2 - \frac{k^2 r^2}{L^2}}}.$$

Если $\frac{r}{L} \ll 1$ то получаем $G(\Omega) = \frac{2\pi i}{k} \exp[iz_0 k(1 - \frac{r^2}{2L^2})]$ - приближенное

выражение для сферической волны.

Выводы. В данной работе показано, что в оптических информационных технологиях, при распространении электромагнитной волны несущей информацию по пространству оптической системы обработки, изменяется конфигурация ее поля. Воспользовавшись известными понятиями ближней и дальней зон (Френеля и Фраунгофера), а также знаниями свойств лазерного излучения, предложены математические описания конфигурации поля в этих зонах, основу которых составляют интегральные преобразования Френеля. Показано, что в оптических информационных технологиях, двумерное преобразование Фурье, наиболее часто используемый математический аппарат. В области Фраунгофера двумерное преобразование Фурье сопровождается дифракцией электромагнитных волн. Предложено математическое описание дифракции на прямоугольном и круглом отверстии, мало отличающиеся от известных [15].

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. Оптические информационные технологии. Спектральное представление сигналов / В. В. Данилов, В. И. Тимченко, И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Сер. Г : Технические науки. –2019. – № 1. – С 36-44.
8. 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»).
9. 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»).
10. Парыгин В. Н. Оптическая обработка информации / В. Н. Парыгин, В. И. Балакший. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1987. – 142 с.
11. Литвиненко О. Н. Основы радиооптики / О. Н. Литвиненко. – Киев : Техніка, 1974. – 206 с.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех / Н. С. Шестов. – Москва : Сов. радио, 1967. – 348 с.
17. 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 03.06.2019 г.

OPTICAL INFORMATION TECHNOLOGIES. ELECTROMAGNETIC WAVE DIFFRACTION

V. Danilov, V. Timchenko, I. Tretiakov

The paper considers the basics of a physical description of the processes of transformation and transfer of information by multidimensional signals. It is shown that in the Fraunhofer region the two-dimensional Fourier transform is accompanied by the diffraction of electromagnetic waves. A mathematical description of the diffraction by a rectangular and a circular hole is proposed.

Keywords: optical information technologies, Fourier and Fresnel transforms, oscillatory process, two-dimensional Fourier transform, diffraction.

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 Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

УДК 004.056.5

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ САЙТОВ ДОННУ

© 2019 *Б.В. Гайван*

Проведены тестирование и сравнительный анализ безопасности двух сайтов образовательных заведений «ГОУ ВПО Донецкий национальный университет» (г. Донецк, ДНР) и Донецкий национальный университет имени Василя Стуса (г. Винница, Украина). Разработаны рекомендации для web-разработчиков по повышению безопасности сайтов учебных заведений ДНР.

Ключевые слова: анализ безопасности сайтов, ДонНУ ДНР, ДонНУ Винница, «черный ящик».

Введение. В условиях информационной войны с Украиной, разработчикам ДНР необходимо быть особенно бдительными и постоянно совершенствовать навыки детектирования и устранения веб-уязвимостей. 9 мая 2016 года украинскими хакерами были взломаны официальные сайты государственных учреждений ДНР и выложены ролики, принижающие роль СССР в завоевании победы, 2 июня 2016 года были взломаны сайты МГБ ДНР и ЛНР и контент заменен оскорбительными материалами, в ноябре 2017 года была проведена DDoS атака на сайт министерства образования ДНР, закончившаяся полным deface сайта [1].

Нарушение информационной безопасности сайтов может быть вызвано рядом причин: недостаточной квалификацией разработчиков в сфере обеспечения безопасности; незнанием или непониманием руководством организации всей важности данной проблемы, либо экономией средств; пренебрежением разработчиков вопросами обеспечения безопасности или отложения их решений на последнюю стадию – стадию тестирования приложения. Вследствие наличия любых нарушений безопасности в веб-приложениях злоумышленник может, в зависимости от своих целей, осуществить один из сценариев атак, таких как, получение доступа к системе, повышение привилегий пользователя, внедрение вредоносного программного обеспечения и др. В данной работе проведено исследование официального сайта Донецкого национального университета на уязвимость к большинству известных атак методом «черного ящика», то есть без знания подробностей функционирования системы. Для сравнения был также проведен анализ уязвимости сайта так называемого Донецкого национального университета имени Василя Стуса (г. Винница, Украина).

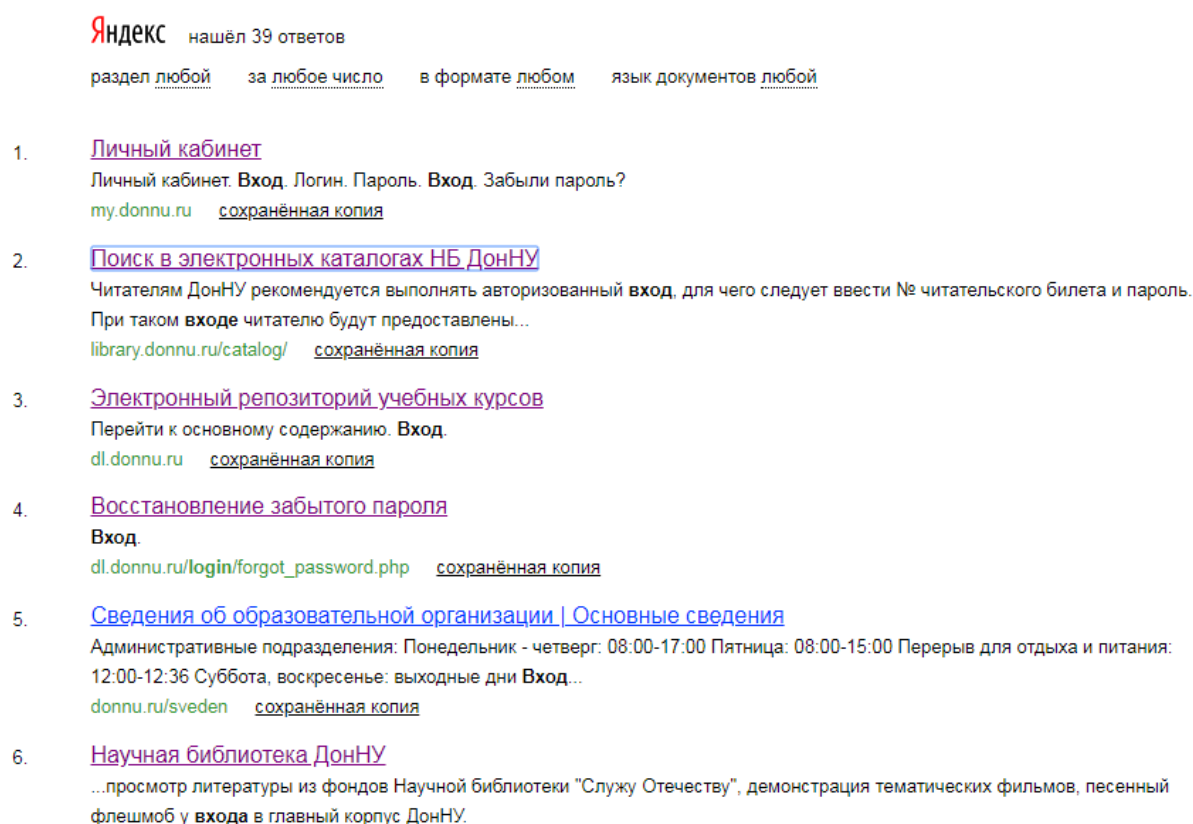
Постановка задачи. Для выявления уязвимостей были выбраны следующие методы: пассивный сбор информации для сайтов, проверка под-доменов, проведение атак типа SQL инъекция и XSS, активное сканирование сайтов [2]. При этом не должно было быть нанесено никакого вреда целевым сайтам, все атаки носили научный характер и были направлены на изучение уязвимостей с целью повышения безопасности. Пассивный сбор информации включал: сканирование портов, сканирование древа сайта, выбор ширины атаки. Активный -включал: проверку портов, проверку на уязвимость к атакам, попытки получения доступа [3].

Для пассивного сбора информации использовались следующие программы и ресурсы: OWASP ZAP, Advanced Port Scanner, сайт 2ip.ru, браузеры, Insomnia, Kali Linux. В целях безопасности, в данной статье описаны не все подробности найденных уязвимостей. Полный отчет направлен владельцам сайтов. Задача авторов - не

скомпрометировать сайты, а продемонстрировать процесс тестирования на безопасность и привлечь внимание разработчиков к проблеме.

Анализ сайта ДонНУ г. Донецка. На сайте ДонНУ города Донецка имеется информация о местоположении учреждения и контактные телефоны, однако указан несуществующий номер дома, номера телефонов верны, но на них не отвечают.

Сайт разрабатывался и поддерживается кафедрой компьютерных технологий физико-технического факультета. Сайт имеет несколько видов экрана, для различных гаджетов, однако авторизоваться можно только через компьютер. Если в строку поиска от Яндекса по ресурсам сайта, вписать слово «Вход», можно получить список связанных ресурсов, которые можно включить в ширину атаки (рис.1).



Яндекс нашёл 39 ответов

раздел [любой](#) за [любое число](#) в формате [любом](#) язык документов [любой](#)

- [Личный кабинет](#)
Личный кабинет. **Вход**. Логин. Пароль. **Вход**. Забыли пароль?
my.donnu.ru [сохранённая копия](#)
- [Поиск в электронных каталогах НБ ДонНУ](#)
Читателям ДонНУ рекомендуется выполнять авторизованный **вход**, для чего следует ввести № читательского билета и пароль. При таком **входе** читателю будут предоставлены...
library.donnu.ru/catalog/ [сохранённая копия](#)
- [Электронный репозиторий учебных курсов](#)
Перейти к основному содержанию. **Вход**.
dl.donnu.ru [сохранённая копия](#)
- [Восстановление забытого пароля](#)
Вход.
dl.donnu.ru/login/forgot_password.php [сохранённая копия](#)
- [Сведения об образовательной организации | Основные сведения](#)
Административные подразделения: Понедельник - четверг: 08:00-17:00 Пятница: 08:00-15:00 Перерыв для отдыха и питания: 12:00-12:36 Суббота, воскресенье: выходные дни **Вход**...
donnu.ru/sveden [сохранённая копия](#)
- [Научная библиотека ДонНУ](#)
...просмотр литературы из фондов Научной библиотеки "Служу Отечеству", демонстрация тематических фильмов, песенный флешмоб у **входа** в главный корпус ДонНУ.

Рис. 1. Ответ поисковика «Яндекс» на запрос «ДонНУ вход»

Открыты порты для FTP подключения (21,22), http и https (80, 443), 111 для почты, а также 3306 – база данных MySQL. Возможно подключение к базе извне, что не совсем безопасно. Имеется файл robots.txt (рис. 2), для поисковых систем.


```

Disallow: /INSTALL.sqlite.txt
Disallow: /install.php
Disallow: /INSTALL.txt
Disallow: /LICENSE.txt
Disallow: /MAINTAINERS.txt
Disallow: /update.php
Disallow: /UPGRADE.txt
Disallow: /xmlrpc.php
# Paths (clean URLs)
Disallow: /admin/
Disallow: /comment/reply/Disallow: /filter/tips/
Disallow: /node/add/
Disallow: /search/
Disallow: /user/register/
Disallow: /user/password/
Disallow: /user/login/
Disallow: /user/logout/
# Paths (no clean URLs)
Disallow: /?q=admin/
Disallow: /?q=comment/reply/
Disallow: /?q=filter/tips/
Disallow: /?q=node/add/
Disallow: /?q=search/
Disallow: /?q=user/password/
Disallow: /?q=user/register/
Disallow: /?q=user/login/
Disallow: /?q=user/logout/

```

Рис. 2. Файл robots.txt сайта ДонНУ г.Донецка

Disallow, означает запрет индексации страницы, есть несколько интересных ссылок. Это query параметры, инсталлеры и xmlrpc.php, xmlrpc.php, через которые зачастую проводят DDos атаки. Таким образом найдены ресурсы, которые будут проверяться в активном режиме: <http://repo.donnu.ru> library.donnu.ru, <http://science.donnu.ru>. Сайт написан на языке php версии 5.3.13 и в качестве сервера используется apache/2.2.22.

Сайт <http://repo.donnu.ru>, вероятно - локальная база данных, так-как открыты порты только для http. Приложение настроено, но явно не полностью. На него не предусмотрен переход без авторизации, стандартные логин и пароль user = tomcat, pass =s3cret, не позволяют войти. Сайт научной библиотеки ДонНУ, library.donnu.ru, на данный момент не предполагает аутентификации. Из списка открытых портов видно, что 3389 открыт, и данные на сайт загружаются удалённо, вероятно, в локальное хранилище. Логин и пароль подобрать не получилось. Сайт «Наука ДонНУ», <http://science.donnu.ru>, имеет доступ к БД, попытки подключиться к которой не увенчались успехом, и FTP подключение. Каждый из перечисленных ресурсов безопасен, но есть возможность получить к ним доступ. Однако высока вероятность раскрыть себя, если ведется статистика неудачных подключений и есть так называемый «Черный список». Для проверки на XSS атаки и SQL инъекцию, по ссылке <http://www.donnu.ru/node> был использован параметр page. При наличии SQL уязвимости, при неверном параметре page, SQL должна вернуть ошибку. Доступ к странице page=1 получить невозможно, значит этот параметр обрабатывается. Но так-как, доступа к БД нет, значит активный XSS не возможен, и отраженный тоже не проходит, запросы вида: [http://www.donnu.ru/node?page=<script>alert\('XSS'\)</script>](http://www.donnu.ru/node?page=<script>alert('XSS')</script>).и[http://www.donnu.ru/node?q=<script>alert\('XSS'\)</script>](http://www.donnu.ru/node?q=<script>alert('XSS')</script>) результатов не дают.

Подключение к базе данных без логина и пароля невозможно, но так-как порт открыт можно провести брутфорс, и если нет слушателя порта 3306, то взлом базы данных будет делом времени.

Анализ сайта ДонНУ г. Винницы. Сайт <https://www.donnu.edu.ua> использует технологию WordPress. Сайт написан на php версии 7.2.16, операционная система Microsoft Server. Можно сделать вывод что сайты конструкционно похожи. Однако, сайт г. Винницы развернут скорее всего на отдельной машине, так-как используется Microsoft

Server. Донецкий сайт развернут как приложение, что экономит время, место на жестком диске и позволяет использовать компьютер не только как сервер.

Исследуя древо сайта, можно увидеть wp директории, такие-как, wp-admin, wp-json и wp-content. Есть файл admin-ajax.php, для асинхронных запросов [4]. Есть вход для обычных пользователей, функция восстановления пароля не работает. Запрос исполняется около секунды, это долго, слабое место для DdoS атаки, однако есть защита от таких атак, от компании Cloudflare (рис. 3) [5].

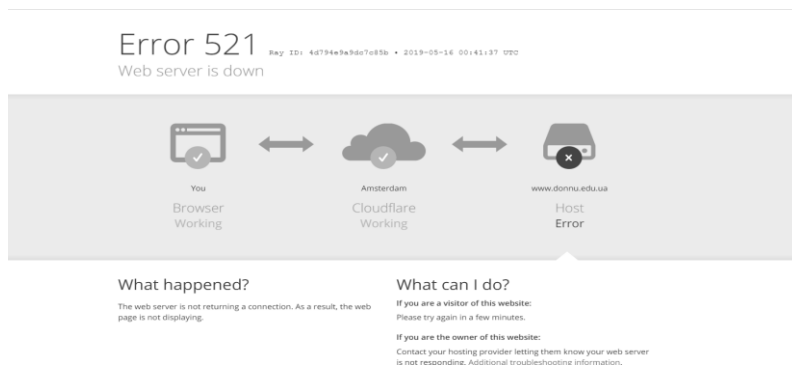


Рис. 3. Защита от DDos Cloudflare

Есть свой API, и все пути и настройки указаны в директории wp-json . Это позволяет узнать, какие запросы и аргументы могут быть отосланы серверу. Для такого рода сайтов, их стараются скрыть. Для большинства запросов необходима аутентификация, что показывает, что нет необходимости в открытии этих данных.

Проверка по активным портам: открыты стандартные порты, 2052, 2082, 2086, 2095 – ошибка, нет SSL подключения, порты 2053,2083,2087,2096 – не слушаются. Порт – 2053 для удалённого подключения через Kerberos, 2083, 2087 – порты для удалённого подключения к cPanel. Порт 2089 для почты cPanel. Выше 49000 есть несколько открытых портов непонятного назначения (рис.4).

```

root@kali: ~
File Edit View Search Terminal Help
1688/tcp open nsjtp-data
3268/tcp open globalcatLDAP
3269/tcp open globalcatLDAPssl
3389/tcp open ms-wbt-server
49154/tcp open unknown
49155/tcp open unknown
49157/tcp open unknown
49158/tcp open unknown
49176/tcp open unknown
Warning: OSScan results may be unreliable because we could not find at least 1 o
pen and 1 closed port
Device type: bridge|general purpose
Running (JUST GUESSING): Oracle Virtualbox (98%), QEMU (92%)
OS CPE: cpe:/o:oracle:virtualbox cpe:/a:qemu:qemu
Aggressive OS guesses: Oracle Virtualbox (98%), QEMU user mode network gateway (
92%)
No exact OS matches for host (test conditions non-ideal).
OS detection performed. Please report any incorrect results at https://nmap.org/
submit/ .
Nmap done: 1 IP address (1 host up) scanned in 19.39 seconds
root@kali:~# nmap -sV donnu.edu.ua
Starting Nmap 7.70 ( https://nmap.org ) at 2018-11-02 03:41 EDT

```

Рис. 4. Открытые порты выше 49000

Для проверки на SQL инъекцию был взят параметр s, который отвечает за поиск - <https://www.donnu.edu.ua/uk/page/4/?s=1+AND+2>. Запрос срабатывает с заменой пробела, значит есть обработка данных, которые получают от клиента. Запрос [https://www.donnu.edu.ua/uk/page/4/?s= <script>alert\(XSS\)</script>](https://www.donnu.edu.ua/uk/page/4/?s=<script>alert(XSS)</script>) выдает ошибку 403. Вероятно, есть проверка на ключевые слова, и по их нахождению сервер не рендерит страницу.

Сайт хорошо защищен благодаря Wordfence, нет открытого порта для базы данных, а DDOS атака по admin-ajax.php бессмысленна из-за его хостинга. Есть смысл уменьшить нагрузку на admin-ajax.php, и закрыть порты, которые не прослушиваются. Один из компонентов отдает адрес для аутентификации в phpMyAdmin, и ключ “nonce”, который не зависит ни от времени, ни от значений Cookie. Можно предположить, что это «соль».

За все время исследования на оба сайта было отправлено множество некорректных запросов, их количество доходило до 30 запросов на каждый порт, ни разу не возникло исключений и можно было продолжать взаимодействовать с сервером.

Результаты. В таблице 1 приведен сравнительный анализ двух сайтов, в ней вписано только те уязвимости, которые вызывали подозрения. Первый столбец, это критерий оценки уязвимости, второй и третий – результаты для обоих сайтов.

Таблица 1. Сравнение сайтов ДонНУ

Критерий	Сайт «ДонНУ» г.Винница	Сайт «ДонНУ» г.Донецк
Наличие стандартного доступа к системным страницам	Да	Нет
Проверка ввода	Имеется	Имеется
Современное ПО	Да	Нет
Взлом пароля аутентификации	Нет	Нет
Воздействие на чувствительные данные	Нет	Нет
Межсайтовый скриптинг (XSS)	Нет	Нет
Уязвимость к SQL- инъекций	Нет	Нет
Отказ в обслуживании	Нет	Вероятна DDoS атака
Фильтрация многократного логирования и мониторинга	Нет	Нет
Конфиденциальная информация	Нет доступа	Нет доступа
Использование уязвимых компонентов	Возможно	Нет

Для php проектов принято убирать стандартные адреса к системным страницам. У Винницкого сайта имеется стандартный вход в php my Admin, wr директивы. Проверка ввода – у обоих сайтов есть ограничения на доступ к служебным страницам, не удаётся перейти, например, на страницы создания пользователей. Сайт г.Донецка, имеет устаревшее программное обеспечение, начиная от версии PHP и заканчивая версией приложения сервера. Это может, привести к эксплуатации известных уязвимостей этих версий, при более жестких атаках. Для обоих сайтов стоят нестандартные логин и пароль. Оба сайта не имеют данных в LocalStorage, а Cookies имеют уникальные значения. Не найдено уязвимости к XSS и SQL инъекциям, все данные запросов к базам

данных обрабатываются. У Винницкого сайта есть защита от DDoS атак от компании «Cloudflare», у Донецкого сайта доступен файл `xmlrpc.php`, который может быть атакован, для осуществления брут-форса, и открыт порт для общения с базой данных.

Выводы. В процессе тестирования ни на одном из исследуемых сайтов не найдено уязвимостей, которые бы позволили злоумышленнику скомпрометировать информацию или внедрить вредоносный код. Однако, найденные недочёты могут быть взяты злоумышленниками за основу, при выборе вектора атаки.

Рекомендации разработчикам сайта «ДонНУ» г.Донецк: обновить программное обеспечение, скрыть порт для доступа к базе данных.

Рекомендации разработчикам сайта «ДонНУ» г.Винница: скрыть системные директивы и файлы, скрыть API проекта, который не предназначен для внешних сервисов.

Разработчикам обоих сайтов стоит понизить порог для занесения пользователей в «Черный список», если он имеется, и создать такой список, если его не имеется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крупные атаки хакеров в 2001-2016 годах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/info/1408961> . – Назв. с экрана
2. Особенности тестирования веб-приложений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://quality-lab.ru/key-principles-of-web-testing/>.
3. Web testing. Основные тесты [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://jobshifter.info/web-testing-basics.html>.- Назв. с экрана
4. Файл `admin-ajax.php` и нагрузка на сервер [Электронный ресурс].- Режим доступа: <https://wpmag.ru/2015/admin-ajax-performance/>.- Назв. с экрана
5. Cloudflare [Электронный ресурс].- Режим доступа: <https://www.cloudflare.com/lp/overview-x>.- Назв. с экрана

Поступила в редакцию 04.06.2019 г.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SITE DONNU SECURITY

B. Gaivan

The testing and comparative safety analysis for two sites of educational institutions “SEE HPE Donetsk National University” (Donetsk, DPR) and Donetsk National University named after Vasyl Stus (Vinnitsa, Ukraine) were carried. Recommendations for web developers on improving the websites security of DPR educational institutions have been developed.

Keywords: site security analysis, DonNU DPR, DonNU Vinnitsa, “black box”.

Гайван Богдан Валерьевич

студент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, Донецк.
E-mail: bogdah9bogdan9@gmail.com

Gaivan Bogdan

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

АТАКИ НА НЕЙРОСЕТЕВЫЕ КЛАССИФИКАТОРЫ

© 2019 М.В. Бабичева

Проведены анализ и классификация современных методов генерирования вредоносных данных для нейросетевых классификаторов. Оценены границы предположительного «обмана» автоматизированных систем аутентификации на глубоких нейронных сетях и предложены способы защиты от подобных атак, на этапе разработки систем.

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

Введение. Глубокие нейронные сети широко применяются в автоматизированных системах для распознавания образов, создания чат-ботов, преобразования речи в текст и автоматического перевода. Однако в последнее время появились исследования, доказывающие, что особенности функционирования нейронных сетей делают их уязвимыми к целенаправленным атакам. В особенности это касается классификаторов образов. В статье рассмотрены способы изменения данных, которые позволяют «обмануть» нейросети глубокого обучения, в то время как, человек продолжает классифицировать изображения корректно.

Анализируя имеющиеся результаты исследований можно сделать вывод, что на сегодняшний день существует 2 основных метода генерирования вредоносных данных для введения в заблуждения нейросетевых классификаторов: градиентный спуск и генетические алгоритмы. На рисунке 1 представлена предлагаемая автором классификация. Основные идеи применяемых алгоритмов описаны ниже.

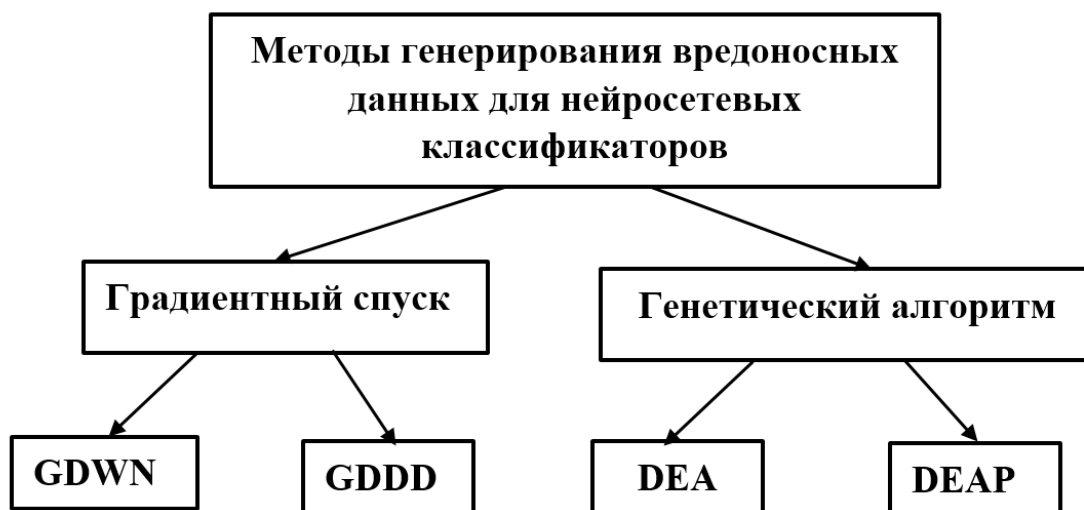


Рис. 1. Классификация методов генерирования вредоносных данных для нейросетевых классификаторов

Градиентный спуск с добавлением статического белого шума по всему изображению (Gradient Descent with static White Noise GDWN). В одной из первых работ, был предложен метод искажения пикселей изображения чтобы классификатор принял ошибочное решение. Для создания фиктивных изображений используется алгоритм обратного распространения ошибки [1]. В основе данного метода лежит тот эмпирический факт, что, если искажения не превышают некоторого минимального значения, то классификатор не игнорирует их, как, казалось бы, предусмотрено логикой работы нейронной сети, а учитывает при отнесении объектов к тому или иному классу. Уравнение, описывающее такую классификацию:

$$w^T \tilde{x} = w^T x + w^T \varepsilon,$$

где x — входные данные, предназначенные для введения нейросети в заблуждение, \tilde{x} — выходные данные классификатора по неизменённому изображению, ε — специальный вектор, добавляемый к исходным входным данным таким образом, чтобы вся сеть приняла ошибочное решение о классификации, который определяется как:

$$\varepsilon = \text{sign}(\nabla_x J(\theta, x, y)),$$

где ∇_x — это градиенты (относящиеся к входным данным), J — функция оценки, используемая для обучения нейросети, θ — параметры нейросетевой модели, x — входные данные, y — целевые выходные данные, то есть «ошибочный» класс.

Поскольку все функции модели сети являются дифференцируемыми, значения градиента можно легко найти с помощью метода обратного распространения ошибки. Изменив входные данные и выяснив с помощью анализа градиентов, какое направление нужно изменить, можно заставить сеть неправильно классифицировать изображение.

Градиентный спуск с добавлением ограниченного количества искажающих данных (Gradient Descent with limited amount of Distortion Data GDDD). В дальнейших исследованиях доказано, что достаточно изменить только небольшую часть изображения, чтобы получившееся изображение было ошибочно отнесено к другому классу [2].

Для начальных входных данных x , если вероятность принадлежности x к классу t равна $f_x()$, то задача описывается уравнением:

$$\text{maximize}(e(x))f_{adv}(x + e(x)),$$

где, adv — оптимизируемый вредоносный класс, $e(x)$ — фальшивые данные, которые добавляются ко входным данным. Однако в этом случае у $e(x)$ есть ограничение:

$$\|e(x)\|_0 \leq d.$$

Эта формула означает, что количество элементов в векторе x должно быть меньше настраиваемого параметра d .

Недостатком представленных выше методов является необходимость наличия у исследователя исчерпывающих данных об архитектуре и методах обучения нейронной сети. Для реальных атак на готовые системы не всегда возможно получить такие данные.

Дифференциальный генетический алгоритм (Differential Evolutionary Algorithm DEA). Если у атакующего нет доступа к архитектуре сети, вместо градиентного спуска используется дифференциальный генетический метод. Берутся образцы «родителей», на основе которых генерируются образцы «потомков», а из них потом оставляют лишь те, что получились лучше «родительских» для решения задачи. Затем выполняется новая итерация генерирования образцов «потомков». Этот подход

позволяет находить правильные значения для вредоносных входных данных, не зная, как работает модель нейронной сети, и даже если модель не будет дифференцируемой, в отличие от предыдущих методов. При этом значение параметра d может быть равно 1, то есть изменять можно только один пиксель [3].

Заплата на основе дифференциального генетического алгоритма (Differential Evolutionary Algorithm Patch DEAP). Еще один метод, вредоносная заплатка, — совсем новая методика генерирования фальшивых изображений [4]. В предыдущих методах вредоносные данные добавлялись к исходным входным данным и напрямую зависели от этих данных. Авторы вредоносной «заплаты» подбирают данные, которые подходят для всех изображений. Термин «заплата» в данном случае нужно понимать, как изображение меньшего, относительно входных изображений, размера, которое накладывается поверх входных, чтобы обмануть классификатор. Оптимизация работает в соответствии с уравнением:

$$\hat{p} = \operatorname{argmax}_p E_{x \sim X, t \sim T, l \sim L} [\log Pr(\hat{y} | A(p, x, l, t))],$$

где, \hat{p} — подобранная заплатка, \hat{y} — целевой (т. е. ошибочный) класс, $A(p, x, l, t)$ — функция применения заплатки. Она случайным образом решает, куда и как накладывать заплатку на входное изображение. В ней p — сама заплатка, x — входное изображение, l — место наложения заплатки, t — преобразование заплатки (например, масштабирование или вращение).

Важно отметить, что в этом случае, система обучается на всех изображениях в наборе данных, и на всех возможных преобразованиях. В итоге заплатка «обманывает» классификатор на всех изображениях набора данных. Это главное отличие данного метода от трех предыдущих. Можно подобрать заплатку, которая работает на большом наборе изображений. В авторской работе приведено изображение заплатки, которую можно накладывать на изображения для обмана классификатора. На рисунке 2 представлены результаты такого рода экспериментов с фотографиями физических объектов.

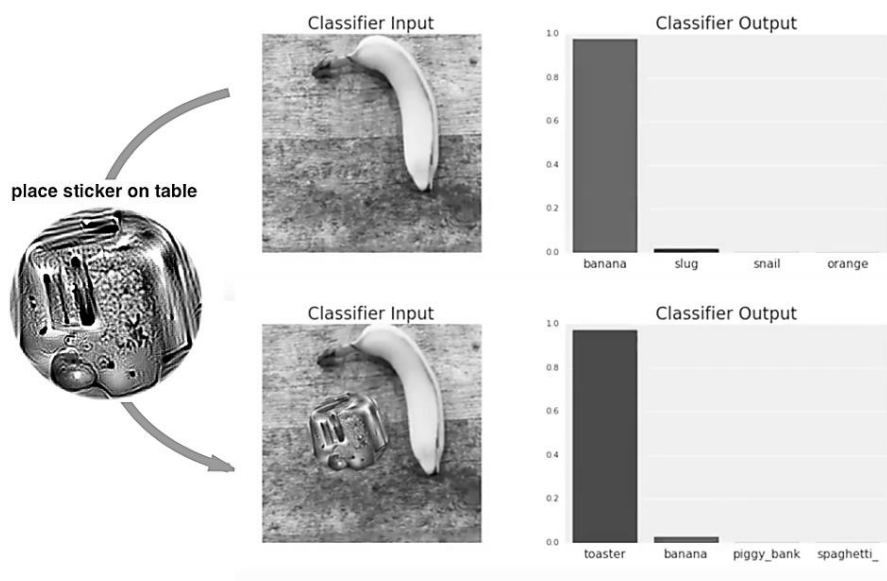


Рис. 2. Если разместить на столе заплатку, сгенерированную как класс «тостер», рядом с бананом, то эта фотография классифицируется как тостер с вероятностью 99% (нижний график)

На сегодняшний день алгоритм DEAP является самым перспективным поскольку позволяет генерировать заплатки, которые в последствии можно использовать многократно с различными изображениями и объектами. Недостатком этого метода является то, что заплатку видит человек, но не «видит» нейронная сеть и значит такого рода фальсификации можно применять только в полностью автоматизированных системах, без участия человека.

Атаки на системы распознавания речи. «Обмануть» можно не только модели, классифицирующие изображения. М. Альянтот, З. Ван и Б. Шриваставайн на конференции ICASSP, посвященной акустике, распознаванию речи и обработке сигналов, показали, как можно ввести в заблуждение модели автоматического распознавания речи [5]. Особенность звуковых данных заключается в том, что входные вектора нельзя легко изменить с помощью метода обратного распространения ошибки. Причина в том, что входные данные для звукового классификатора проходят через косинусное преобразование, для которого требуется вычислять коэффициенты косинусного преобразования Фурье. Функция для вычисления этих коэффициентов не является дифференцируемой, поэтому оптимизировать входные данные с помощью метода обратного распространения ошибки нельзя. Используется генетический алгоритм, аналогичный рассмотренному выше для обработки изображений. Ученые продемонстрировали сгенерированный ими сигнал, который человеком воспринимается как шум, но распознается голосовым классификатором, как команда перейти на вредоносный сайт.

Выводы. Все описанные выше методы пока ни разу не применялись злоумышленниками для реальных атак. Это связано с тем, что данные алгоритмы все еще находятся на стадии исследования и не выходят за пределы лабораторий. Кроме того, приложения, связанные с денежными транзакциями, компрометация которых как раз и может заинтересовать злоумышленников, в настоящее время, нечасто применяют полностью автоматизированную нейросетевую аутентификацию. Однако со временем классификаторы на глубоких нейронных сетях будут использоваться всё шире, в том числе для аутентификации пользователей банков и интернет-магазинов. Поэтому важно знать, каким образом можно «обмануть» нейросети, заставив их неверно классифицировать объекты, для оценки границ предположительного обмана подобных систем и нахождения способов защиты от подобных атак, еще на этапе разработки.

В качестве решения проблемы можно предложить построение сетей, обучающихся в том числе на ложноположительных примерах. Однако вновь созданные фальшивые изображения могут «обманывать» сеть даже в этом случае, кроме того, данный подход ведет к повышению вычислительной сложности алгоритмов. Хотя алгоритмы глубоких нейронных сетей все-таки отличны от тех, которые работают в человеческом мозге, исследования в области физиологии также могут дать множество новых идей. Одна из них – это бинокулярное зрение. Использование дополнительных данных, например, от вторичных стереокамер и 3D сканеров также может создать защиту от атак на нейронные классификаторы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Intriguing properties of neural networks / C. Szegedy, W. Zaremba, I. Sutskever [et al.] // International Conference on Learning Representations. – 2014. – P. 135-139.
2. Fawzi A. Are classifiers really invariant? /A. Fawzi, P. Frossard // Manitest: In British Machine Vision Conference (BMVC). – 2015. – P. 106.1-106.13.

3. Jiawei S. K. One pixel attack for fooling deep neural networks / S. K. Jiawei Su, D. Vasconcellos // In Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security. – 2017. – P. 1528-1540.
4. Adversarial Patch / T. B. Brown, D. Mané, A. Roy [et al.] // International Conference on Learning Representations. – 2018. – P. 943-957.
5. Alzantot M. Deep Residual Neural Networks for Audio Spoofing Detection / M. Alzantot, Z. Wang, M. B. Srivastava // International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – 2018. – P. 5679-5683.

Поступила в редакцию 07.06.2019 г.

NEURAL NETWORK CLASSIFIERS ATTACKS

M. Babicheva

The modern methods of generating malicious data for neural network classifiers analysis and classification are carried out. The the alleged "deception" boundaries of automated authentication systems on deep neural networks are estimated and ways to protect systems against such attacks at the stage of system development are proposed.

Keywords: deep neural networks, classifiers on neural networks, image recognition, gradient descent, evolutionary algorithm.

Бабичева Маргарита Вадимовна

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

Babicheva Margarita

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

УДК 621.43+536.421

**ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООВОГО
АККУМУЛЯТОРА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА НА ОСНОВАНИИ
ТЕРМОГРАММ НАГРЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ**

© 2019 В.Д. Александров, Е.А. Покинтелица, А.Ю. Соболев, О.В. Соболев

Разработаны варианты расчетов энергоэффективности работы тепловых аккумуляторов (ТА) фазового перехода на основе соответствующих термограмм нагревания и охлаждения. Предложены и проанализированы формулы для нахождения коэффициентов полезного действия (КПД) работы ТА с теплоаккумулирующими материалами (ТАМ). Энергетический КПД учитывает теплоты зарядки и разрядки, а также теплопотери через поверхность соприкосновения ТА с ТАМ. Показано, что физические (а не искусственные) переохлаждения практически не влияют на КПД, а в ряде случаев способствует его повышению. Даны рекомендации учета тех или иных особенностей при плавлении и кристаллизации ТАМ при анализе эффективности ТА.

Ключевые слова: Тепловой аккумулятор (ТА); теплоаккумулирующие материалы; коэффициент полезного действия; зарядка ТА; разрядка ТА; плавление; кристаллизация; коэффициент теплопередачи; физическое переохлаждение

Энергоэффективность тепловых аккумуляторов (ТА) с фазопереходным теплоаккумулирующим материалом (ТАМ) определяется т.н. энергетическим КПД [1-3]

$$\eta_A = \frac{Q^R - Q_0^R}{Q^Z + Q_0^Z}, \quad (1)$$

где Q^Z – теплота зарядки ТА; Q_0^Z – потери теплоты при зарядке; Q^R – теплота разрядки ТА; Q_0^R – потери теплоты при разрядке. На рис. 1 приведена схема передачи теплоты Q^Z .

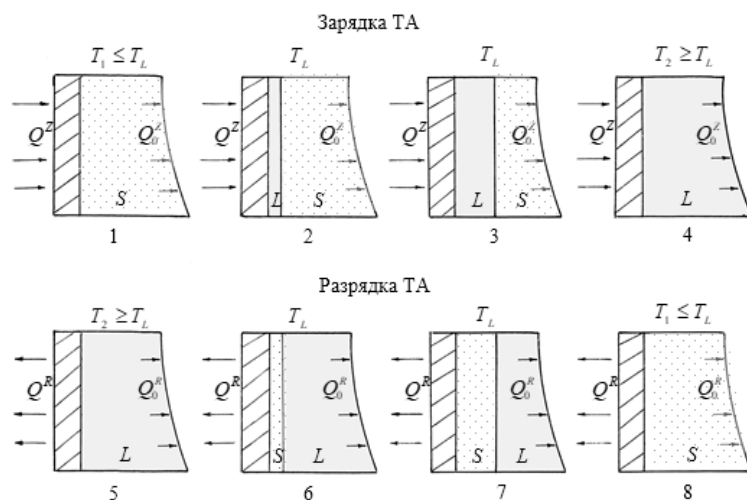


Рис. 1. Схема нагревания и охлаждения ТА с ТАМ фазового перехода

При прогреве твердого ТАМ (позиция 1), его поэтапного перехода из твердого (S) в жидкое (L) состояние (позиции 2-4), а также отвода теплоты Q^R от жидкого (позиция 5), жидко-твердого (позиции 6-7) и твердого ТАМ (позиция 8) с соответствующими отводами теплоты Q_0^Z и Q_0^R в окружающую среду.

Рассмотрим варианты зарядки (Z) и разрядки (R) ТА на основе ТАМ фазового перехода, опираясь на термограммы нагревания и охлаждения [4-6]. На рис. 2 показана схематическая термограмма условного ТАМ, характеризующая равновесное плавление и квазиравновесную кристаллизацию (КРК) при одинаковых скоростях нагревания и охлаждения.

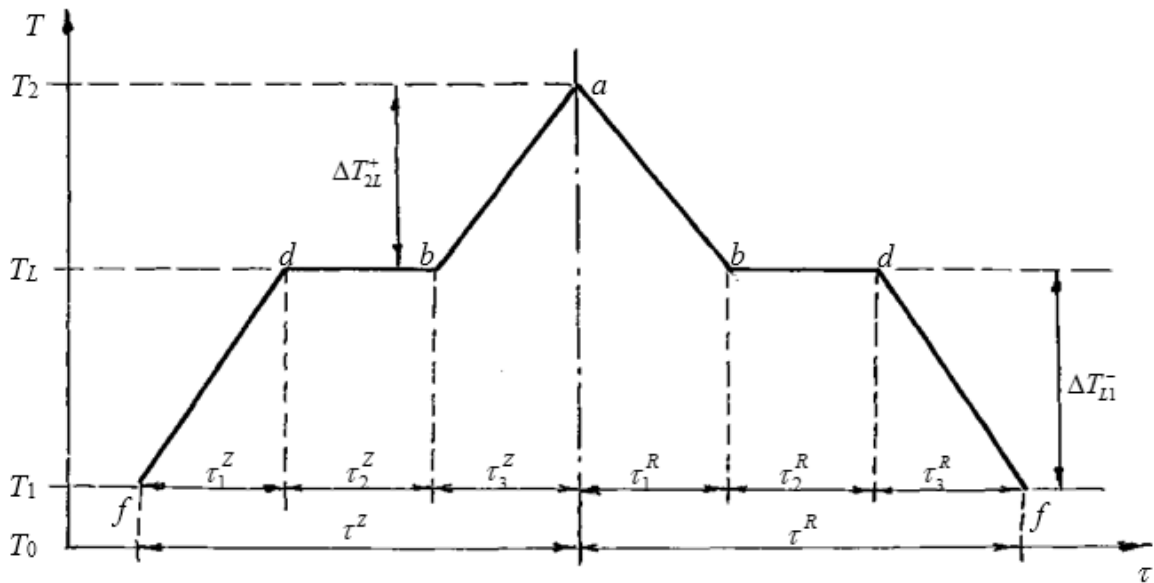


Рис. 2. Схематические термограммы, отражающие процессы зарядки и разрядки ТА при равновесной кристаллизации ТАМ

На данном рисунке $\tau_1^Z, \tau_2^Z, \tau_3^Z$ – времена нагрева твердой фазы, плавления и нагрева жидкой фазы; $\tau_1^R, \tau_2^R, \tau_3^R$ – времена охлаждения жидкой фазы, равновесной кристаллизации и охлаждения твердой фазы; τ^Z, τ^R – общие времена зарядки и разрядки: $\tau^Z = \tau_1^Z + \tau_2^Z + \tau_3^Z, \tau^R = \tau_1^R + \tau_2^R + \tau_3^R$ при одинаковых скоростях нагревания и охлаждения $\tau^Z = \tau^R$.

Согласно данному рисунку, количество теплоты, аккумулируемое при нагревании ТАМ, равно:

$$Q_A^Z = m_A \left[\int_{T_1}^{T_L} c_S(T) dT + \Delta H_{LS} + \int_{T_L}^{T_2} c_L(T) dT \right], \quad (2)$$

где m_A – масса ТАМ; c_S, c_L – удельные теплоемкости ТАМ в областях твердой и жидкой фаз соответственно в интервалах температур от T_1 до T_L и от T_L до T_2 ; T_1 и T_2 – температуры до и после зарядки, ΔH_{LS} и T_L – энтальпия и температура плавления ТАМ.

Количество теплоты, отдаваемое ТАМ в период разрядки (без учета теплопотерь), определяется схожим выражением:

$$Q_A^R = m_A \left[\int_{T_L}^{T_2} c_L(T) dT + \Delta H_{SL} + \int_{T_1}^{T_L} c_S(T) dT \right], \quad (3)$$

где ΔH_{SL} – энтальпия кристаллизации. При отсутствии термического гистерезиса, т.е. при равновесном характере как плавления, так и кристаллизации $\Delta H_{LS} = \Delta H_{SL}$.

Потери теплоты можно представить в виде:

$$\text{при зарядке } Q_0^Z = N\tau^Z, \quad (4)$$

$$\text{при разрядке } Q_0^R = N\tau^R. \quad (5)$$

В работе [3] интенсивность теплопередачи N от ТАМ к стенкам ТА вычисляется по формуле:

$$N = k_A S_A (\bar{T}^{1,2} - T_0) \tau_{Z,R}, \quad (6)$$

где k_A – коэффициент теплоотдачи через стенки ТА; S_A – площадь поверхности, через которую происходит теплообмен между ТАМ и ТА; T_0 – температура окружающей среды.

Величина $\bar{T}^{1,2}$ выражает средние температуры за периоды зарядки τ^Z и разрядки τ^R . Принимая, что зарядка ТА должна осуществляться при температурах ниже T_L , а при разрядке выше T_L , в работе [3] предлагается считать:

$$\text{при зарядке } \bar{T}_Z^{1,2} = T_L - (T_L - T_1) / 2 - T_0, \quad (7)$$

$$\text{при разрядке } \bar{T}_R^{1,2} = T_L + (T_2 - T_L) / 2 - T_0. \quad (8)$$

Действительно, например для парафина, при $T_0 = 0^\circ\text{C}$, $T_1 = 20^\circ\text{C}$, $T_2 = 80^\circ\text{C}$ и $T_L = 60^\circ\text{C}$ получаем из (7) $\bar{T}^1 = 40^\circ\text{C}$, что ниже T_L , а из (8) $\bar{T}^2 = 70^\circ\text{C}$, т.е. $\bar{T}^1 < T_L$, а $\bar{T}^2 > T_L$. Однако, при других исходных данных для того же парафина, например при $T_0 = 10^\circ\text{C}$, $T_1 = 20^\circ\text{C}$, $T_2 = 70^\circ\text{C}$, $T_L = 60^\circ\text{C}$ получаем $\bar{T}^1 = 30^\circ\text{C}$ ($\bar{T}^1 < T_L$), а при $\bar{T}^2 = 55^\circ\text{C}$ ($\bar{T}^2 < T_L$). Выходит, что разрядка ТА должна происходить при температуре ниже температуры T_L , т.е. в отсутствие фазового превращения.

Использование выражения (6) для вычисления интенсивности теплопередачи N предполагает постоянное наличие в процессе теплообмена между ТАМ и стенкой ТА, контактирующей с окружающей средой при температуре T_0 . Если же после прогрева системы ТАМ с ТА устанавливается постоянная температура, равная температуре плавления ($T_0 = T_L$), то в процессе дальнейшей зарядки и разрядки теплопередача от ТАМ к стенкам ТА должна происходить в интервале температур $\Delta T^- = T_L - T$ ($T < T_L$) и $\Delta T^+ = T - T_L$ ($T > T_L$).

Тогда выражение (6) можем записать:

$$\text{при зарядке } N^Z = k_A S_A (T_L - T_1), \quad (9)$$

$$\text{при разрядке } N^R = k_A S_A (T_2 - T_L). \quad (10)$$

На основании вышеизложенного энергетический КПД ТА с ТАМ запишем в виде:

$$\eta_A = \frac{Q^R - k_A S_A (\Delta T^+) \tau^R}{Q^Z + k_A S_A (\Delta T^-) \tau^Z}, \quad (11)$$

где $\Delta T^+ = T_2 - T_L$ – «перегревы», $\Delta T^- = T_L - T_1$ – «переохлаждения».

Из (11) следует, что при Q^R , Q^Z , k_A , $S_A = const$ КПД ТА будет увеличиваться при уменьшении как «перегревов», так и «переохлаждений». Об этом свидетельствуют и графики зависимостей η от ΔT^- для четырех веществ: *m*-терфенила (1), дибензила (2), дифенилметана (3), эвтектического сплава 50масс.% *o*-терфенила-50 масс.% дибензила (4) (рис. 3), построенные при значениях $m_A = 10$ кг, $k_A = 3$ Вт/м²·К, $\tau^R = \tau^Z = 12$ часов, $\Delta T^+ = 10$ К с привлечением справочных характеристик этих веществ (см. таблицу). При этом ТА был выбран цилиндрической формы с параметрами $d = 0,13$ м, $h = 0,8$ м, $S_A = \pi dh + \frac{\pi d^2}{2} = 0,353$ м².

Таблица 1. Термодинамические характеристики углеводородов [7-9].

ТАМ	$T_L, K (^{\circ}C)$	$\Delta H_{LS}, кДж/кг$	$c_L, Дж/кг\cdot K$	$c_S, Дж/кг\cdot K$
<i>m</i> -терфенил	360 (87)	134.6	1811.12	1199.39
дибензил	324 (51)	126.3	1756.28	1392.30
дифенилметан	299 (26)	113.0	1968.73	1581.76
50масс.% <i>o</i> -терфенила-50 масс.% дибензила	297 (24)	100.5	1679.38	1292.66

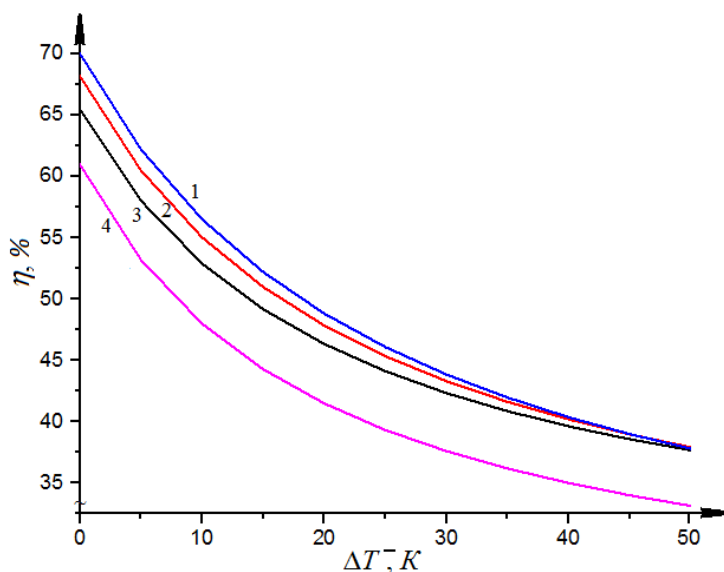


Рис. 3. Зависимость энергетического КПД от «переохлаждений» для *m*-терфенила (1), дибензила (2), дифенилметана (3) и эвтектического сплава системы *o*-терфенил-дибензил (4)

Кроме того, изучалась зависимость КПД ТА от времени его разрядки и от значений коэффициента теплоотдачи ТАМ через стенки ТА. В качестве примера на рис. 4 показаны графики данных зависимостей для дибензила. Видно, что с уменьшением коэффициента отдачи и времени разрядки теплового аккумулятора КПД увеличивается.

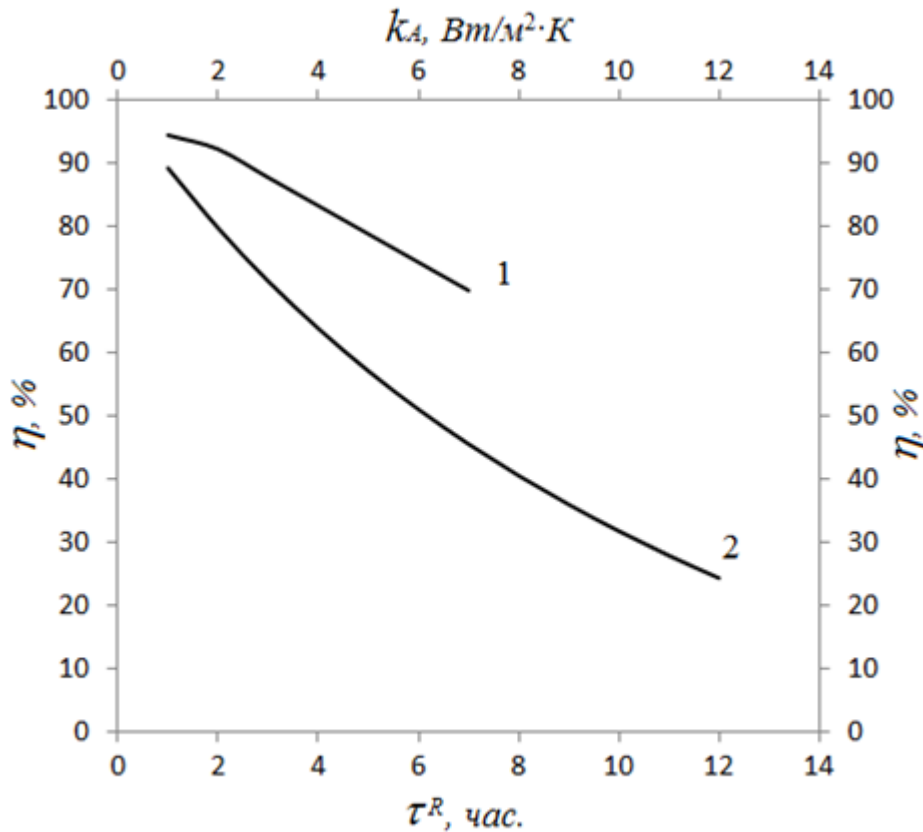


Рис. 4. Графики зависимостей: 1) $\eta_A = f(k_A)$ и 2) $\eta_A = f(\tau^R)$ для дибензила

Изложенное выше и рекомендация по применению формулы (11) с учетом выражений (2-5), (9-10) для вычисления КПД ТА в случае нагрева и охлаждения ТАМ относится к равновесным процессам плавления и кристаллизации, происходящими при температуре плавления T_L и температуре кристаллизации $T_S = T_L$ (рис. 2). Однако, процесс кристаллизации чаще происходит неравновесно из переохлажденной жидкой фазы [4]. Назовем данное переохлаждение «физическим» $\Delta T_\phi^- = T_L - T_{\min}$, где T_{\min} минимальная температура переохлажденной жидкости на момент начала кристаллизации. Как видим из рис. 2, подобное переохлаждение на нём не обозначено. Зато показаны т.н. «переохлаждения» $\Delta T^- = T_L - T_1$ и «перегревы» $\Delta T^+ = T_2 - T_L$, никакого отношения к ΔT_ϕ^- не имеющие. Попутно заметим, что кристаллы практически не перегреваются выше температуры T_L . Следовательно, ΔT^- и ΔT^+ выражают лишь интервалы нагревов и охлаждений твердой и жидкой фаз, а не перегревы твердой и переохлаждения жидкой фаз в физическом смысле.

Рассмотрим вариант неравновесно-взрывной кристаллизации (НРВК), которая возникает из переохлажденного состояния после достижения некоторого физического переохлаждения ΔT_{ϕ}^{-} (рис. 5) [4-5].

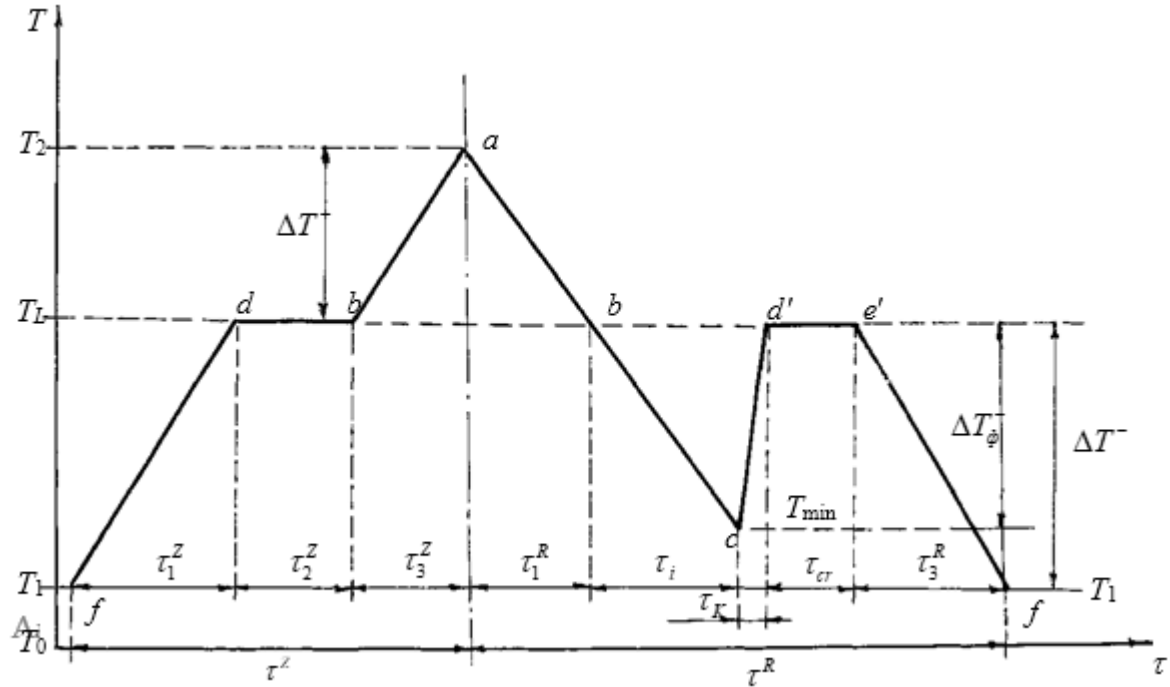


Рис. 5. Схематические термограммы, отражающие процессы зарядки и разрядки ТА при неравновесной кристаллизации ТАМ

Сравнивая термограммы на рис. 2 и рис. 5, видим существенную разницу по кривым охлаждения. Если плато bd на рис. 2 характеризует равновесную кристаллизацию за время τ_2^R , то такая кристаллизация при T_L в случае НРВК (рис. 5) происходит за время $\tau_{cr} < \tau_2^R$ (см. плато $d'e'$). Общее же время кристаллизации типа НРВК $\tau = \tau_i + \tau_K + \tau_{cr}$ меньше τ_2^R при КРК, где τ_i – инкубационный период зародышеобразования, τ_K – время коагуляции зародышей, τ_{cr} – время равновесной кристаллизации оставшейся части расплава.

Анализ величины КПД ТА показывает, что учет τ_{cr} (НРВК) $< \tau$ (КРК) приводит к увеличению η_A , а учет τ^R (НРВК) $> \tau^R$ (КРК) к его уменьшению при равенстве энтальпий плавления ΔH_{LS} и кристаллизации ΔH_{SL} . В случае их отличия друг от друга общая теплота, выделяемая при разрядке при НРВК, равна:

$$Q_A^R = m_A \left[\int_{T_L}^{T_2} c_L(T) dT + (\alpha \Delta H_{SL} + \bar{c} \Delta T_{\phi}^{-} + (1 - \beta) \Delta H_{SL}) + \int_{T_1}^{T_L} c_S(T) dT \right], \quad (12)$$

где \bar{c} – средняя теплоемкость между жидкой и твердой фазами; α – доля зародышей кристаллов, образующихся во всем объеме образца V за инкубационный период τ_i ;

β – доля зародышей в определенном объеме V_x расплава на момент начала их коагуляции.

Величину α определяем по термограмме по отношению времени τ_i к общему времени τ затвердевания расплава ($\alpha = \tau_i / \tau$). Величину β находим из уравнения теплового баланса $\Delta H_{SL} m_x = \bar{c} \Delta T^- m$: $\beta = m_x / m = \bar{c} \Delta T^- / \Delta H_{SL}$ [4].

Анализ выражения (12) вкупе с формулами (3) и (11) показывает, что учет «физического» переохлаждения ΔT_{ϕ}^- может способствовать в ряде случаев увеличению КПД использования ТАМ в ТА.

На КПД, кроме теплот зарядки Q^Z и разрядки Q^R , влияют соответствующие времена зарядки τ^Z и разрядки τ^R . При одинаковых скоростях нагревания и охлаждения, а также равновесной кристаллизации (рис. 2) $\tau^Z = \tau^R$. В случае НРВК (рис. 3), несмотря на одинаковые скорости нагревания и охлаждения, время разрядки τ^R больше времени зарядки τ^Z . Кроме того время разрядки при НРВК больше времени разрядки при КРК.

Вычитая уравнение (3) из уравнения (12), получаем энтальпию неравновесной кристаллизации в виде:

$$\Delta H_{SL} = \Delta H_i + \Delta H_K + \Delta H_{cr}, \quad (12)$$

где ΔH_i – энтальпия зародышеобразования: $\Delta H_i = \alpha \Delta H_{SL}$; ΔH_K – энтальпия коагуляции зародышей: $\Delta H_K = \bar{c} \Delta T_{\phi}^-$; ΔH_{cr} – энтальпия докристаллизации: $\Delta H'_{cr} = (1 - \beta) \Delta H_{SL}$.

В зависимости от величин ΔH_{LS} , ΔH_{SL} , ΔH_i , ΔH_K , ΔH_{cr} , а также соответствующих отрезков времени для каждого вида и этапа кристаллизации в значительной мере может меняться КПД использования того или иного ТАМ в теплоаккумуляторах фазового перехода.

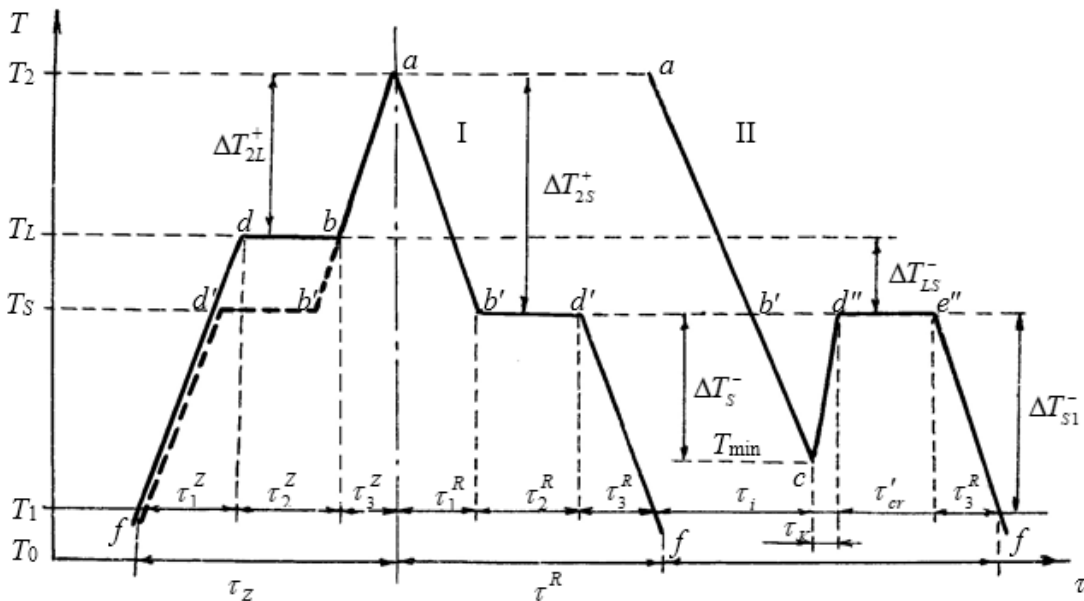


Рис. 6. Термограммы нагревания и охлаждения, отражающие термический

Далее рассмотрим термограммы, характеризующие явление термического гистерезиса (рис. 6). Гистерезисные явления проявляются в случае, когда температура плавления T_L отличается от температуры равновесной кристаллизации T_S [5]. В первом варианте (I) при записи кривой нагревания $fdba$ в одном направлении ($\tau \rightarrow$) и кривой охлаждения $ab'd'f$ в другом ($\leftarrow \tau$) вырисовывается т.н. петля $dbb'd'd$ термического гистерезиса. Вариант II отражает кристаллизацию типа НРВК относительно температуры T_S . В вариантах I и II на участках нагревания $f \rightarrow d \rightarrow b \rightarrow a$ (как и на рис. 2 и 5) количество теплоты, аккумулируемое ТАМ без теплотерь, характеризуется выражением (2). Тогда как количество теплоты, отводимое при охлаждении, запишется в виде:

по пути $ab'd'f$:

$$Q^R = m_A \left[\int_{T_S}^{T_2} c_L(T) dT + \Delta H'_{SL} + \int_{T_1}^{T_S} c_S(T) dT \right], \quad (14)$$

по пути $acd'e'f$:

$$Q^R = m_A \left[\int_{T_S}^{T_2} c_L(T) dT + (\alpha \Delta H_{SL} + \bar{c} \Delta T_{\phi}^- + (1 - \beta) \Delta H_{SL}) + \int_{T_1}^{T_S} c_S(T) dT \right]. \quad (15)$$

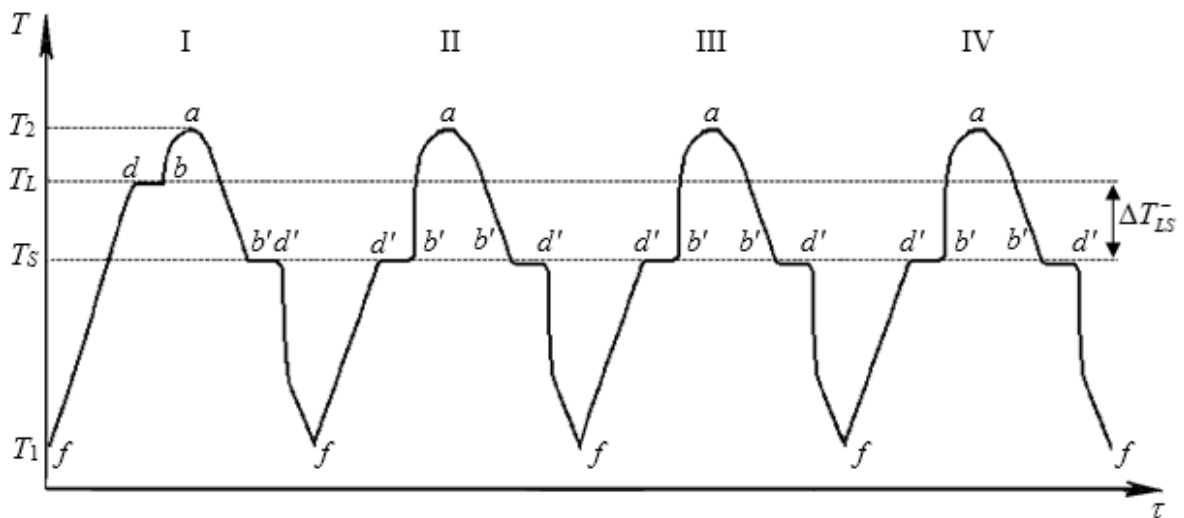


Рис. 7. Термограммы при плавлении и равновесной кристаллизации ТСН-5, отражающие понижение температуры плавления до T_S и неизменность ее (T_S) при последующих циклах.

При непрерывном нагреве и охлаждении различных теплоаккумулирующих материалов проявляются самые разнообразные эндо- и экзо термические эффекты при плавлении и кристаллизации. Так, например, в работе [6] установлено резкое падение температуры плавления ($T_L \approx 48^\circ\text{C}$) у одного из самых распространенных кристаллогидратов (пятиводного тиосульфата натрия, используемого в качестве ТАМ), до 31°C во втором и последующих циклах нагревания и охлаждения. Это явление

схематически показано на рис. 7 при равновесной кристаллизации (КРК) и рис. 6 при неравновесно-взрывной кристаллизации (НРВК). Из этих рисунков следует, что в первом цикле плавление должно происходить при T_L , а в последующих только при $T_S < T_L$.

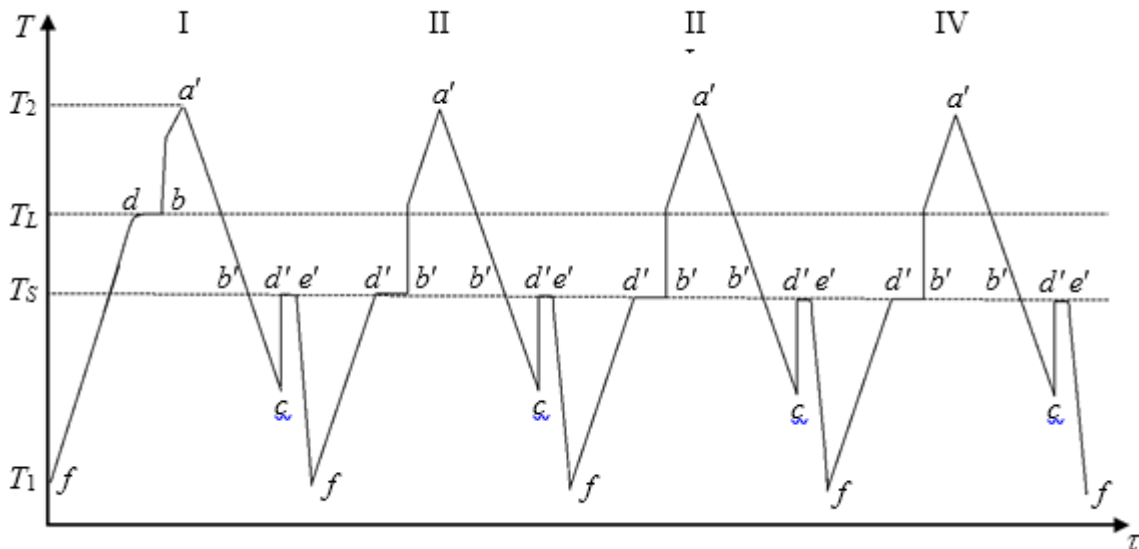


Рис. 8. Термограммы при плавлении и неравновесной кристаллизации ТСН-5, отражающие понижение температуры плавления T_L до T_S , ее неизменность и стабильность переохлаждений от цикла к циклу

Кроме данного эффекта, установлено восстановление начальной температуры T_L после возобновления термоциклирования ТСН-5 на следующий день (рис. 9 и 10). Однако и в данном случае при последующих циклах нагревания и охлаждения имеет место понижение T_L до T_S и стабильность T_S (на рис. 7 и 8).

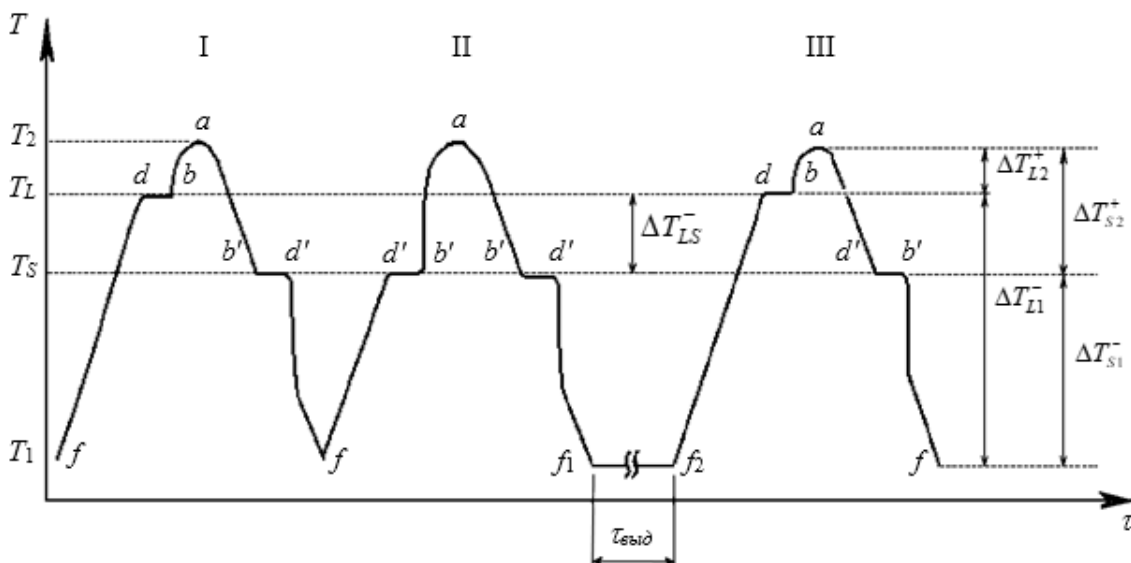


Рис. 9. Термограммы при плавлении и КРК, характеризующие понижение температуры плавления ТСН-5 T_L до T_S и ее восстановление (термограмма III).

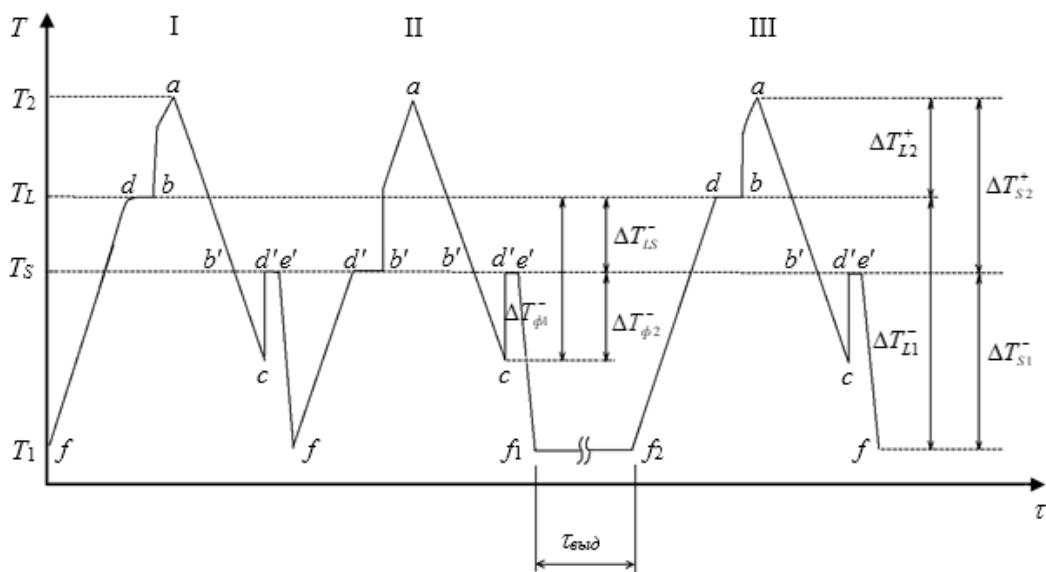


Рис. 10. Термограммы при плавлении и НРВК, характеризующие понижение температуры плавления ТСН-5 от T_L до T_S (I-II) и ее восстановление (термограмма III).

Заключение. Подводя итог, можно сделать следующее заключение. При разработке аккумуляторов теплоты на основе фазовых переходов в настоящее время основные усилия направлены на разработку ТА той или иной формы, на расчет различных конструктивных устройств и таких параметров ТАМ ФП, как объем, площадь поверхности ТА, коэффициент теплопередачи (или термическое сопротивление) на границе ТАМ с ТА, температура и время зарядки и разрядки, энергетический КПД. Вместе с тем, слабо освещается физическая проблема учета процессов самих фазовых переходов и их влияние на эффективную работу ТА. В данной работе на основании собственного большого опыта в исследовании процессов плавления и кристаллизации как экспериментального, так и теоретического плана даются некоторые рекомендации учета тех или иных особенностей фазовых превращений при анализе эффективности ТАМ ФП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левенберг В. А. Аккумулирование тепла / В. А. Левенберг, М. П. Ткач, В. А. Гольстрем. – Киев : Техніка, 1991. – 112 с.
2. Бекман Г. Тепловое аккумулирование энергии / Г. Бекман, П. Гили. – Москва : Мир, 1987. – 272 с.
3. Цымбалюк Ю. В. Анализ энергетической эффективности тепловых аккумуляторов с теплоаккумулирующими материалами фазового перехода / Ю. В. Цымбалюк // Вестник Череповецкого государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 5. – С. 31-36.
4. Александров В. Д. Кинетика зародышеобразования и массовой кристаллизации переохлажденных расплавов и аморфных сред / В. Д. Александров. – Донецк : Донбасс, 2011. – 591 с.
5. Кинетика зародышеобразования и массовой кристаллизации переохлажденных расплавов и растворов : сб. изб. тр. Ч. 2 / В. Д. Александров, В. А. Постников, С. А. Фролова [и др.] ; под общ. ред. В. Д. Александрова ; ГОУ ВПО «ДонНАСА». – Донецк : Донбасс, 2018. – 413 с.
6. Соболев А. Ю. Исследование фазовых превращений в кристаллогидратах солей натрия и их смесей для использования в установках теплоаккумуляции : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / Соболев Александр Юрьевич. – Макеевка, 2018.

7. Справочник химика : [в 6 т.] / редкол. Б. П. Никольский (гл. ред.) и др. – 2-е изд., переработ. и доп. – Москва : Госхимиздат ; Ленинград, 1963. – Т. 2 : Основные свойства неорганических и органических соединений. – 1167 с.
8. Китайгородский А. И. Строение органического вещества : данные структурных исследований, 1971-1973 : [справочник] / А. И. Китайгородский, П. М. Зоркий, В. К. Бельский. – Москва : Наука, 1982. – 510 с.
9. Бабилов Б. М. Органические и кремнийорганические теплоносители / Ю. М. Бабилов, Д. С. Рассказов. – Москва : Энергия, 1975. – 272 с.

Поступила в редакцию 21.05.2019 г.

THE ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF THERMAL ACCUMULATOR OF PHASE CHANGE ON THE BASIS OF THERMOGRAMS OF HEATING AND COOLING

V. Aleksandrov, E. Pokyntelytsia, A. Sobolev, O. Sobol

Options of calculations of energy efficiency of work of the heat accumulators (HA) of phase change on the basis of the corresponding thermograms of heating and cooling are developed. Formulas for finding of the efficiencies (E) of work HA with heat-retaining materials (HRM) are offered and analysed. Power efficiency E considers warmth of charging and a discharge and also heatloss through a contact surface with HRM. It is shown that physical (but not simulated) overcoolings practically don't influence efficiency E, and in some cases promotes its increase. The recommendations of accounting of these or those features during the melting and crystallization are made HRM in the analysis of effectiveness HA.

Keywords: Heat Accumulator (HA); heat-retaining materials; efficiency; HA charging; HA discharge; melting; crystallization; heat transfer coefficient; physical overcooling

Александров Валерий Дмитриевич

доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой физики и физического материаловедения ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», ДНР, г. Макеевка.
E-mail: avd-crystal@mail.ru

Aleksandrov Valery

Doctor of Chemical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Physics and Physical Materials Science of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka.

Покинтелица Елена Анатольевна

ассистент кафедры физики и физического материаловедения ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», ДНР, г. Макеевка.
E-mail: lnk0013@gmail.com

Pokyntelytsia Elena

Assistant Lecturer at Department of Physics and Physical Materials Science of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka.

Соболев Александр Юрьевич

кандидат технических наук, ст. преподаватель кафедры физики и физического материаловедения ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», ДНР, г. Макеевка.
E-mail: trashover@ukr.net

Sobolev Alexander

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at Department of Physics and Physical Materials Science of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka.

Соболь Оксана Викторовна

кандидат химических наук, доцент кафедры физики и физического материаловедения ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», ДНР, г. Макеевка.
E-mail: trashover@ukr.net

Sobol Oksana

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor at Department of Physics and Physical Materials Science of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО
ХОЗЯЙСТВА



UDC 669.162

STUDY OF THE EMISSION PARAMETERS DURING IRON TAPPING FROM A
HOLDING FURNACE TO A LADLE IN AZOVSTAL MC

© 2019 V.V. Bodryaga, V.V. Belousov, F.V. Nedopekin, V.I. Bondarenko, S.F. Prokhorenko

The experimentally parameters of dust and gas emissions at different times overflow iron is determined. The extreme degree of dust-depressing of nitrogen consumption in a steel plant converter shop is theoretically obtained.

Keywords: red fume; filming; pig iron overflow; dust-depressing; nitrogen.

Introduction. One of the sources of fugitive emissions in the converter shops is the process of iron tapping from a holding furnace into a ladle. This process step is accompanied by formation and release of a significant amount of dust. The main components of dust are primary graphite (about 30%) and red fume (about 70%) [1, 2]. A portion of these emissions is removed from the shop, and another portion settles on the metal structures.

The gas flows generated during ladle filling with liquid iron play an important role during the red fume formation and formation of the emission plume from the ladle. The air flow delivers oxygen to the metal stream dispersion zone, then oxygen of the gaseous phase interacts with the iron splashes and the red fume resulted from this interaction is carried out from the ladle with the emission flux into the environment.

One of the effective methods to reduce the red fume emissions is feed of a neutral gas, such as nitrogen, into the ladle. It is possible to significantly reduce the red fume emissions by gas supply to the ladle during its filling with iron, provided the neutral gas reaches the metal stream dispersion zone [2].

The problem description. The parameters of emissions during iron tapping are important in the design of graphite recovery exhaust systems and the units for dust suppression by neutral gas. In particular, calculation of the exhaust and dust suppression efficiency includes the flow rates in the emission plume, temperature and dust content of the flow, etc. All these quantities come under those determined experimentally, thus requiring considerable labour and time inputs, therefore, integration of these data and their reduction to convenient average rates are of great practical importance.

Digital filming of the liquid iron tapping from the holding furnace to the ladle was carried out in the absence of dust suppression with nitrogen to determine the rate of red fume emissions.

The filming was carried out in the holding furnace area of the oxygen converter shop in Azovstal Metallurgical Complex, when tapping iron from 2,500-ton holding furnace into 350-ton converter ladle.

The data were processed separately for the initial period of the ladle filling (the first 30 s), when the emission parameters differed markedly from those for the rest of the metal discharge period, and for the main ladle filling period.

Experiment data processing. The rate was determined by the method for processing indirect measurements [3]: the entire filming was converted to frames, the time scale was 25 frames = 1 s. Then, the filming scale was determined as the ratio of the known dimension, i.e. the ladle diameter, to the dimension on the screen, determined in pixels. The ladle diameter is 5 m, it makes 150 pixels on the screen. Consequently, the dimensional scale is 1 m = 30 pixels. The formula for determining the gas emission rate:

$$v = \frac{L}{t} = \frac{25x}{30n} = \frac{5x}{6n}, \quad (1)$$

where $t = n/25$ is observation time, s; n is the number of displayed frames; $L = x/30$ is the distance traveled by the emission, m; x is the number of pixels on the screen corresponding to this distance.

The experimental data were processed in accordance with the sequential method [4]. In this case, we deal with processing the results of indirect measurements, since we find the value of the target variable of the emission rate from the results of direct measurements of other variables (time and height of the emission rise), with which the measured variable is tied by a functional relationship.

The obtained values of the emission rate (v) in the main tapping period and the error (Δ) are given in Table 1.

Table 1. Experimental values of the rate and its error

t_{cp}, s	15	30	45	60	75	90	105	120
$v, m/s$	1.70	2.22	2.30	2.31	2.17	1.97	2.02	1.72
$\Delta, m/s$	0.27	0.35	0.24	0.16	0.37	0.49	0.25	0.37

After processing the experimental results, it can be concluded that the values of the rate of gaseous emissions at different instants of iron discharge represent pulsatory oscillation around the average value (2.05 m/s).

The gas flow rate in emissions is determined by the formula:

$$V_0 = Sv, \quad (2)$$

where V_0 is the gas volume flow rate in the emission plume, m³/s; S is the emission zone area, m²; v is the average velocity of emissions, m/s.

The diameter of the 350-ton ladle is 5 m, taking into account the approximate dimensions of the emission zone; after substituting the numerical values in (2) we obtain the average volume flow rate of emissions, 40.2 m³/s.

The degree of dust suppression during discharge from the holding furnace into the ladle for the holding furnace area of the converter shop in Azovstal Metallurgical Complex. Reduction of red fume emissions from iron discharges can be achieved by reducing the oxygen concentration in the gaseous phase, for example, by supplying a neutral gas to the smoke formation zone. In this case, various technical solutions of the problem in hand are possible.

Relationship (3) expresses the relation between the dust suppression degree and the controlled process and design parameters [3]:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{0,25Q^2}{w_{kp}^2 n^2 (0,085ld + 0,145d^2)^2} - \frac{0,81Q}{w_{kp} n (0,085ld + 0,145d^2)} + 1 \right) \times \exp \left(21,655 - \frac{1}{0,04618 - 0,016Q/V} \right) / \sqrt{1 - 0,347Q/V} \quad (3)$$

where w_{kp} is the critical velocity of the neutral gas stream, at which iron drops start breaking down, m/s ; n is the number of nozzles through which nitrogen is supplied; Q is the neutral gas flow rate, m^3/s ; V is volume flow rate of the incoming air, m^3/s ; d is the nozzle diameter, m ; l is the distance from the nozzle to the surface of interaction, m .

We shall use the conservation law to determine the volume flow rate. We shall find that the volume flow rate in the emission plume is related to the volume flow rate of the air entering the ladle. In this case it is necessary to take into account that the process is non-isothermal due to the fact that the carried out flow of emissions is heated up to $200^{\circ}C$

$$V = \alpha V_0, \quad (4)$$

where $\alpha = 0.577$ is the coefficient of volume expansion.

Table 2 gives the numerical values that characterize the conditions of the process of iron discharge from the holding furnace to the ladle for the holding furnace area in Azovstal Metallurgical Complex.

Table 2. Values of the parameters characterizing the iron discharge process

Process parameters	During discharge from the holding furnace to the ladle
d is the nozzle diameter, m	0.15
l is the distance from the nozzle to metal, m	2
w_{kp} is critical velocity, m/s	12.9
V is volume flow rate of the incoming air, m^3/s	23.2
h is the average height of the stream fall, m	6.5

The data from Table 2 are substituted in relationship (3). The calculations are given for the case of using three nozzles in the dust suppression unit. The graphic representation is shown in the Figure.

As a result of the Figure analysis, the maximum value of the dust suppression degree and the values of the neutral gas flow rate were obtained:

$$\varepsilon_{\max} = 0,837 \text{ with nitrogen flow rate } Q = 2,16 \text{ m}^3 / \text{s} . \quad (5)$$

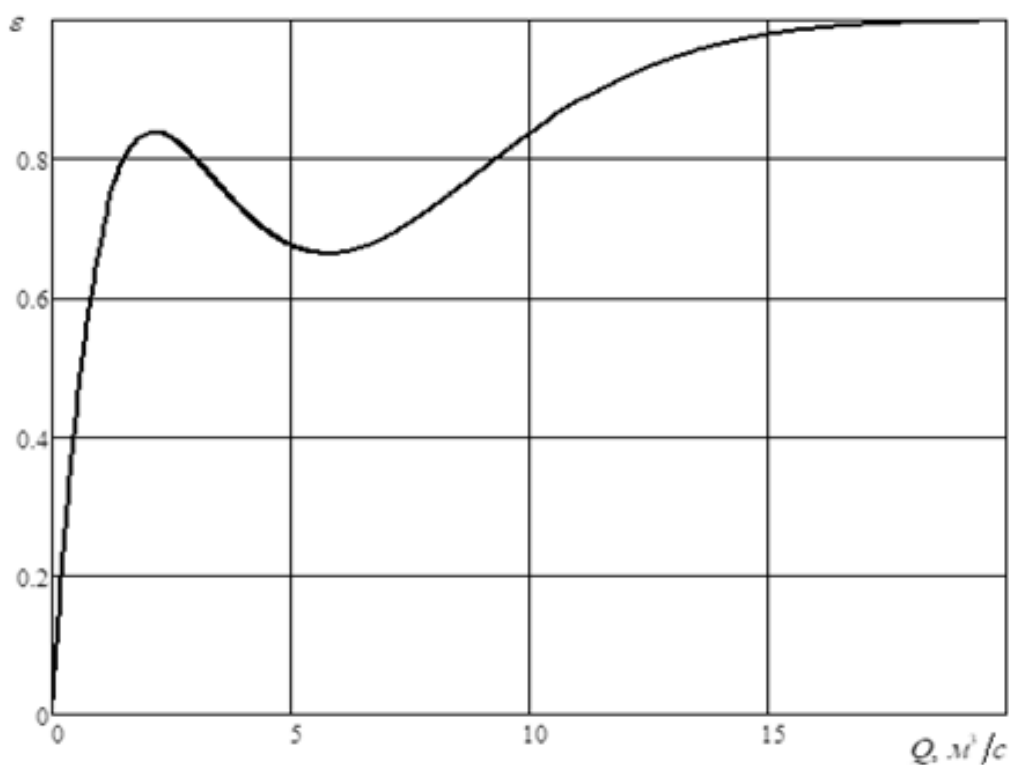


Figure 1. Relationship between the dust suppression degree and the nitrogen flow rate (for 3 nozzles)

It has been found out (Figure 1) that as the neutral gas flow rate increases at the beginning, the smoke formation process is suppressed by reducing the oxygen concentration and additional coagulation of the iron splashes. Later on, an increase in the nitrogen flow rate leads to a higher velocity of the gas stream, and after its critical value is exceeded, the dust suppression efficiency begins to fall due to an additional dispersion of large iron splashes.

Conclusions:

- The parameters of dust and gas emissions at different instants of iron tapping were determined.
- The dust suppression degree was found out in the conditions of the converter shop of Azovstal Metallurgical Complex for the case of the dust suppression unit using nitrogen supply through three nozzles.
- The obtained results can be used in development of the rational regimes of red fume suppression with neutral gas, in order to improve the environmental situation in the holding furnace area.

REFERENCES

1. Study of the environmental problem of red fume formation / F.V. Nedopekin, V.A. Kravets, V.V. Bodryaga, V.V. Timakov // Metallurgical heat engineering : collection of research papers. – Dnepropetrovsk : Porogi, 2004. – P. 221-229.
2. Kravets V. A. Red fume suppression during iron tapping / V. A. Kravets. – Donetsk : UkrNTEK, 2002. – 186 p.

3. Investigation of the effect of thermal convection on distribution of gas flows during iron tapping / F. V. Nedopekin, V. V. Belousov, V. A. Kravets, V. V. Bodryaga // VI Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer : Abstracts of reports and messages, May 19-23, 2008. – Minsk, 2008. – Vol. 2. – P. 323-324.
4. Zakharov I. P. Processing measurement results / I. P. Zakharov. – Kharkov, 2003. – 116 p.

Received May 16, 2019

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫБРОСОВ ПРИ СЛИВЕ ЧУГУНА ИЗ МИКСЕРА В КОВШ НА МК АЗОВСТАЛЬ

В.В. Бодряга, В.В. Белоусов, Ф.В. Недопекин, В.И. Бондаренко, С.Ф. Прохоренко

Экспериментально определены параметры пылегазовых выбросов в разные моменты времени перелива чугуна. Теоретически получена экстремальная зависимость степени пылеподавления от расхода азота в условиях конвертерного цеха металлургического комбината.

Ключевые слова: бурый дым; киносъёмка; переливы чугуна; пылеподавление; азот.

Бодряга Виктор Викторович

старший преподаватель кафедры компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: vvbod@yandex.ru

Bodryaga Victor

Senior Lecturer at Department Computer Technologies of Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

Белоусов Вячеслав Владимирович

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха, ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: v.v.bilousov@gmail.com

Belousov Vyacheslav

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

Недопекин Федор Викторович

доктор технических наук, профессор кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха, ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: f.nediopekin@gmail.com

Nedopekin Fedor

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

Бондаренко Виталий Иванович

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: vitbond@gmail.com

Bondarenko Vitaliy

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at Department Computer Technologies of Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

Прохоренко Светлана Филипповна

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

Prohorenko Svetlana

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

УДК 67.08:504.062

ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРЕРАБОТКИ УТИЛЬНЫХ СВИНЦОВО – КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

© 2019 М.М. Ялалова, А.И. Сердюк

Рассмотрены известные методы переработки отслуживших свинцово-кислых аккумуляторных батарей. Показаны достоинства и недостатки пирометаллургических, гидрометаллургических и электрохимических способов утилизации отработанных аккумуляторов.

Ключевые слова: утилизация; свинцово-кислотные аккумуляторы; пирометаллургия; гидрометаллургия; электрорафинирование; электрохимия.

Согласно статистическим данным, в 2016-2017 гг. в Донецкой Народной Республике образовалось порядка 6 млн. т отходов, из них: 10,1 т отходов 1 класса опасности, 409,9 т отходов 2 класса опасности, 2394,9 т отходов 3 класса опасности [1]. Около 50 % отходов 1 и 2 классов опасности пришлось на г. Донецк. Среди типичных опасных отходов можно выделить люминисцентные лампы (соединения ртути, 1 класс), отработанные нефтепродукты (углеводороды, 2 класс), аккумуляторы (серная кислота, сурьма, свинец – 2-3 классы).

В настоящее время нерешенным остается вопрос утилизации отработанных аккумуляторов.

Пирометаллургическая переработка свинцового сырья. Первоначально были разработаны способы плавки в шахтных и отражательных печах. Шахтная печь по использованию тепла и по восстановительной способности является самой эффективной, однако процесс обладает существенными недостатками, связанными с большим расходом кокса, с очисткой отходящих газов, с утилизацией шлаков [1]. В стационарной отражательной печи нагрев и расплавление шихты осуществляется за счет тепла, выделяющегося при сжигании топлива (мазут, природный газ) в газовом пространстве над ванной печи. В качестве восстановителя используют кокс. Недостатками такого способа плавки являются: недостаточный прогрев расплава по вертикали, что приводит к замедлению реакций восстановления и образованию трудноотделимых от свинца продуктов, неполному восстановлению свинца из шлака (необходимость дополнительной его очистки); большой объем дутья и необходимость очистки большого количества отходящих аэрозолей и газов.

В дальнейшем распространение получили вращающиеся печи и электроплавка [3]. В первом случае используется тепло нагреваемых факелом стенок и, в отличие от стационарной печи, происходит постоянный подогрев расплава изнутри и его перемешивание. Процессы идут с большей скоростью и меньшим расходом топлива. Если использовать кислород в дутье вместо воздуха, то сокращается объем отходящих газов и потери с ними тепла. Плавка во вращающихся печах используется на 60% всех мощностей заводов мира, перерабатывающих свинцовые батареи. Основными недостатками плавки являются периодичность работы, принятие специальных мер по избеганию запыленности и загазованности на рабочих местах, получение вместо шлака натриевого штейно-шлакового расплава, опасного для окружающей среды из-за своей химической нестойкости. При использовании руднотермических электрических печей тепло выделяется непосредственно в слое жидкого шлака с высоким удельным

сопротивлением при прохождении через него электрического тока, а также при микродуговом заряде в газовой фазе у поверхности электрода. В электропечи возникают мощные конвективные потоки, которые интенсивно перемешивают шлак, нагревают его и способствуют более быстрому и глубокому протеканию реакций. Коэффициент полезного использования тепла в электропечи составляет около 70%, что значительно превышает этот показатель у отражательной печи. Прямой нагрев шлака позволяет исключить использование дополнительного топлива и воздушного дутья для его сжигания и, следовательно, сократить объем отходящих газов и потери тепла с ними в несколько раз. Отходящие газы направляют на окисление в камеру дожигания, затем охлаждают, очищают от свинецсодержащей пыли в рукавных фильтрах и от диоксида серы в системе мокрой очистки газов. При переработке продукта десульфуризации пасты содержание диоксида серы в газах незначительно, и очистка их упрощается. Основными недостатками электропечи являются значительная зависимость экономических показателей производства от стоимости электроэнергии, периодическое появление наростов на стенках печи, что приводит к необходимости повышения температуры расплава, то есть к увеличению непроизводительного расхода электроэнергии, электродов, огнеупоров. Дальнейшее совершенствование этого процесса и конструкции печей позволит создать наиболее эффективную и наименее опасную для окружающей среды технологию переработки свинцовых батарей.

Еще одним перспективным процессом плавки вторичного свинцового сырья является использование технологии Ausmelt, в основе которой лежит использование вертикальной цилиндрической футеровочной печи с длинной фурмой, погруженной сверху в расплав [4]. Через фурму непосредственно в расплав вводят топливо и воздух или кислород. Получается прямой нагрев расплава и его бурное перемешивание горящими газами. Переработка материалов происходит в две последовательные стадии: расплавление шихты, восстановительное обеднение шлака. Газы обеих стадий охлаждают и очищают с использованием традиционного оборудования для очистки газов. Повышенные экологические показатели в процессе Ausmelt достигаются за счет полного укрытия печи, работающей под отрицательным давлением, и герметизации всех отверстий. Внутрипечное дожигание технологических газов при температуре выше 1300 °С и последующее их быстрое охлаждение позволяют иметь очень низкое содержание в выбросах диоксинов и фуранов. Недостатками процесса Ausmelt являются получение богатых и бедных по свинцу шлаков в одном агрегате, что ускоряет износ футеровки, и предположительно небольшой срок работы погружной фурмы из-за выгорания нижней части.

С мая 2012 года в Днепропетровске начал функционировать первый в Украине и СНГ завод по безотходной переработке использованных аккумуляторных батарей ООО «Рекуперация свинца» Международной научно-промышленной корпорации «Ветро Энергетические Солнечные Технологии Аккумулирующие» («ВЕСТА»). Практикуемый на заводе закрытый технологический цикл позволяет перерабатывать все составляющие аккумуляторных батарей, в том числе и электролит. Свинец, получаемый в процессе переработки аккумуляторов производственными мощностями завода, используется при изготовлении новых аккумуляторов, кристаллический сульфат натрия – при изготовлении стекла, шлак и гранулированный полипропилен - в дорожно-строительной промышленности. Перерабатывающий процесс не предполагает возможности попадания технологических стоков в окружающую среду – в производстве применяется исключительно вода атмосферных осадков. Возможные масштабы переработки аккумуляторных батарей заводом в год составляют почти 3

млн. экземпляров [5]. Однако не сообщается стоимость свинца, полученного на данном предприятии.

Гидрометаллургическая переработка свинцового сырья.

Пирометаллургическая схема производства свинца многостадийна и сложна и легкоплавкий свинец по этой схеме получается процессами, протекающими при высокой температуре. В связи с этим осуществлялись длительные поиски иных схем, в частности гидрометаллургических.

За границей наиболее интенсивные работы в области гидрометаллургии свинца в лабораторном и полужаводском масштабе велись главным образом в период 1915—1925 гг. Тогда были предложены и изучены несколько вариантов процесса, основанного на выщелачивании сульфата свинца растворами хлористых натрия и кальция, и установлены основные технологические параметры и технико-экономические показатели этого способа [6]. Указанные соли являются практически единственными промышленными растворителями. Хлористый свинец плохо растворяется в воде: концентрация его при 60° не превышает 1,8%. В солевом растворе, содержащем 300 г/л NaCl, концентрация PbCl₂ достигает 95 г/л. При выщелачивании PbSO₄ образуется Na₂SO₄, во избежание накопления которого вводят CaCl₂, связывающий ион SO₄²⁻ в нерастворимый CaSO₄.

Схема получения свинца гидрометаллургическим способом состоит из следующих операций:

- 1) перевод соединений свинца в растворимые формы;
- 2) выщелачивание свинецсодержащего продукта;
- 3) очистка растворов;
- 4) осаждение свинца из чистых растворов.

Для перевода свинца в формы, растворимые в хлоридных рассолах применяют процессы сульфатизации и хлорирования.

К числу первых надо отнести сульфатирующий обжиг, сульфатизацию крепкой серной кислотой при 300° (способ Маковецкого) и жидкую сульфатизацию [7].

В число способов хлорирования входят: хлорирующий обжиг с применением ZnCl₂, CaCl₂, CuCl₂, MgCl₂, FeCl₃ а также газообразного HCl при 400—500°C, хлорирование газообразным хлором, хлорирование концентрированной соляной кислотой, разложение сульфидов свинца и одновременное выщелачивание его. растворами FeCl₃ + NaCl + CaCl₂. Обработка сульфидов растворами хлорного железа без добавки других хлоридов в отличие от всех прочих методов подготовки сырья к выщелачиванию хлоридными рассолами устраняет опасность выделения вредных газов, пылей и паров. При выщелачивании в раствор переходит значительное количество примесей. Очистка растворов основана на реакциях вытеснения металлов в зависимости от их нормальных потенциалов.

Для осаждения свинца из очищенных растворов применяются различные способы: кристаллизация PbCl₂ с последующим электролизом его в расплаве NaCl, цементация свинца железным скрапом или губчатым железом, электролиз с растворимыми анодами, осаждение свинца известью с последующим восстановлением гидрата до металла [8].

Из перечисленных способов цементация и электролиз наиболее распространены.

Из литературных источников известны данные о некоторых технологических схемах, подвергавшихся проверке в лабораторных и полупромышленных условиях.

Опытный завод Тинтик Стэндрт (Юта, США) ежедневно перерабатывал 200 т руды, содержавшей свинец преимущественно в окисленной форме [9]. Руда содержала

4% Pb, 0,12% Zn, 0,35% Cu, 56% SiO₂ и 16,3% Fe₂O₃+Al₂O₃. Хлоридный обжиг тонкоизмельченной руды производили во взвешенном состоянии, а выщелачивание огарка — противоточным методом. Раствор очищали от серебра губчатой медью и от меди — цементацией железом. При нагревании раствора до 75°C свинец из него осаждали на железном скрапе. Цементный свинец требовал обычного рафинирования. Опытный завод находился в эксплуатации несколько лет.

На другом 200-т заводе этой же компании после осаждения серебра и меди из раствора железным скрапом раствор подвергали в ряде баков с ложными днищами контактированию с губчатым железом, полученным восстановлением в трубчатой печи низкосортной железной руды. Цементный осадок содержал от 40 до 60% Pb, до 20% Fe и много пустой породы. Его направляли в свинцовую плавку [9].

На опытном заводе Бункер-Хилл (Айдахо, США) на 50 т установке перерабатывали руду, содержащую до 95% пустой породы, предварительно измельченную и обожженную в электропечи при 500°C [10]. Галенит окисляли в печи в сульфат, затем его выщелачивали с последующим электролизом раствора. На этой установке успешно проверена схема переработки свинцовых сульфатных кеков.

Фирмой Амальгамейтед Цинк К° (Австралия) переработано 9 т концентрата, содержащего 6% Pb, 48% Zn и 215 г/т Ag. Концентрат смешивали с ZnCl₂ и при 400—500°C хлорировали свинец, серебро, мышьяк, сурьму и олово. Остаток выщелачивали подкисленной водой и дважды хлоридным раствором, после чего кек содержал 0,21% Pb и 52% Zn. Указанный процесс, по оценке Рельстона, является весьма перспективным [11].

На опытной установке АО «Институт «ГИЦВЕТМЕТ» (г.Москва) свинцовый концентрат после сушки хлорировали элементарным хлором и выщелачивали водой [12]. После фильтрации перешедшие в раствор хлориды меди и цинка направляли на разделение, а свинцовый кек, содержащий серебро, золото и серу, выщелачивали раствором NaCl. При этом после фильтрации получался кек, содержащий золото и серу, и раствор PbCl₂·NaCl, из которого PbCl₂ выделяли кристаллизацией. Электролизом расплавленного PbCl₂ в присутствии NaCl получали металлический свинец и регенерировали хлор. Раствор от кристаллизации, содержащий хлористый натрий, возвращали на выщелачивание. Расход хлора, составляющий 110% к теоретическому для хлорирования сульфидов, превышает его возврат от электролиза PbCl₂.

Уразов Г.Г. и др. исследовали в укрупненно-лабораторном масштабе возможность выщелачивания серной кислотой сульфатизированного огарка. В сернокислый раствор переходил цинк, а свинцовый кек выщелачивали хлористым натрием в присутствии губчатого железа. Образующийся губчатый свинец после промывки водой и брикетирования плавил на металл, а раствор после регенерации, при которой отделяется гипсово-железный кек, возвращали на выщелачивание [13]. На 1 т свинца расходовали 750 кг NaCl, т. е. 105—110% к теоретическому количеству губчатого железа. Аппаратурно процесс не решен.

В лабораторных условиях проверена возможность выщелачивания сульфидных концентратов раствором хлорного железа. При 80° и расходе FeCl₃ 153% к теоретическому на сумму металлов за 90 мин. разложилось 99% соединений свинца, 32% меди, 19% цинка и 11% соединений железа. При электролизе раствора было установлено, что добавка в рассол CaCl₂ делает электролиз свинца более устойчивым. При температуре электролита 35°C и катодной плотности тока 150 А/м² выход по току достигал 95% и расход энергии 2000 кВт·ч/т катодной губки [14].

Рассмотренные схемы не охватывают всего количества проведенных в данном направлении исследований.

Следует отметить, что свинец, получаемый хлорными методами, отвечает марке ГОСТа 3778-65 [15] С-4, т. е. требует рафинирования. Получение свинца через стадию выделения его в виде губки, затрудняющей обслуживание электролитных ванн и трудно обрабатываемой, заметно осложняет процесс. Кристаллизация $PbCl_2$, призванная исключить трудности, связанные с электролизом, порождает другие трудности, связанные с резким изменением предела насыщения растворов свинцом при высоких температурах.

Подготовка сырья к выщелачиванию методами сульфатизации и хлорирования связана с токсическими операциями, поэтому несмотря на наличие не одного десятка различного рода хлоридных гидрометаллургических схем, разработанных в лабораториях и частично проверенных в полужаводском масштабе, процесс не нашел пока промышленного применения.

Процесс, разработанный Х. Ахоненом, Дж. Линдроосом, В. Сарккиненем и Р. Сеппаненом (Финляндия), предназначен для выделения свинца из лома аккумуляторных батарей путем обработки последнего водным раствором хлорида щелочного металла и соляной кислотой при повышенной температуре. При этом происходит растворение свинца, содержащегося в сырье, с образованием хлорида свинца. Процесс включает также стадии отделения водного раствора хлористого свинца от нерастворимого гартблея, кристаллизации хлористого свинца из охлажденного раствора и отделения кристаллов от жидкости, а также электролиза хлористого свинца с получением металлического свинца [16].

Процесс для выделения свинца и других компонентов из утильных аккумуляторов описан М. Е. Эльмором и Дж. К. Клангом [17]. Этот гидрометаллургический процесс для извлечения пасты и электролита из утильных свинцовых аккумуляторов начинается с отделения пасты и электролита от других компонентов. Затем пасту подвергают реакции с электролитом для того, чтобы повысить содержание сульфата свинца в пасте и уменьшить содержание кислоты в электролите. После этого из реакционной смеси удаляют избыток жидкости, а пасту смешивают с водно-аммиачным раствором сульфата аммония, в результате чего происходит растворение большей части сульфата свинца, присутствующего в пасте. Полученный концентрированный раствор соли свинца отделяют от оставшихся твердых материалов и осаждают карбонат свинца, добавляя карбонат или бикарбонат аммония или углекислый газ. Осадок карбоната свинца отделяют от жидкой фазы и либо переводят в оксид свинца путем кальцинирования, либо обрабатывают серной кислотой с последующим кальцинированием или подвергают взаимодействию с восстановителем для перевода диоксида свинца в оксид свинца и полученный материал обрабатывают серной кислотой для увеличения содержания в нем сульфата свинца.

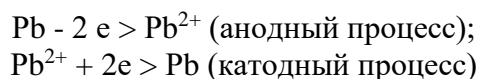
Гидрометаллургические способы практически не применяются в настоящее время, объясняется это существенными недостатками процесса:

- необходимость подготовки концентрата к выщелачиванию посредством сульфатирующего или хлорирующего обжига – операция дорогая и сложная;
- при выщелачивании получается большое количество растворов вследствие ограниченной растворимости свинцовых соединений в испытанных растворителях;
- при осаждении из хлоридных растворов как цементацией, так и электролизом свинец получается в виде губки, которую требуется брикетировать для получения удовлетворительного выхода свинца в чушковой металл при переплавке;
- получаемый по гидрометаллургической схеме свинец нуждается в рафинировании.

Электрорафинирование черного свинца. При пирометаллургической восстановительной плавке получают черновой свинец, загрязненный сурьмой, оловом, мышьяком, медью. Черновой свинец из вторичного сырья рафинируют в основном пирометаллургическими способами, однако в ряде случаев используется электрорафинирование (после обезмеживания).

Методом электролиза в настоящее время рафинируют около 20% производимого в мире свинца [18]. Доля электролитного свинца все время возрастает. Это стимулируется возможностью получения свинца высокой чистоты в одну-две стадии. Сдерживают широкое распространение этого метода малая интенсивность процесса, сложная схема переработки анодных шламов и трудности подбора электролита для его осуществления.

Процесс электролитического рафинирования заключается в электрохимическом растворении анодов, отлитых в виде пластин массой до 200 кг из предварительно обезмеженного огневым способом свинца, и осаждении чистого свинца на катоде:



Катодом служат тонкие листы (толщиной - 1 мм) очищенного свинца.

Электролит состоит из водного раствора H_2SiF_6 (8-10%) и PbSiF_6 (6-8%Pb). Плотность тока 130-180 А/м², выход по току 90-96%. Расход электроэнергии на 1 т свинца - примерно 200 кВт·ч.

Электролиз проводят в железобетонных ваннах с кислотоупорной футеровкой из винипласта или керамики объемом до 6 м³. В ванны завешивают от 24 до 40 анодов и на один больше катодов. Аноды растворяют в течение 6-12 суток, извлекая их каждые 3-6 суток для очистки от шлама. Продолжительность наращивания катодов чаще всего 2-3 суток.

Полученные катоды после промывки переплавляют в рафинировочных котлах под слоем едкого натра с перемешиванием с целью дополнительного рафинирования свинца от сурьмы и мышьяка. После удаления порошкообразных оксидных съёмов свинец направляют на разливку. Чистота электролитного свинца 99,995-99,997% [19].

Электролитическое рафинирование свинца имеет в настоящее время все же ограниченное применение. До последнего времени считали, что электролизу целесообразно подвергать только висмутистый свинец. Эта точка зрения, видимо, не совсем верна, так как помимо крупнейшего завода Трейл, применяющего этот способ уже давно, имеются заводы в Италии, в Китае и Корее, также применяющие электролиз [20].

Металлы более положительные, чем свинец, остаются в анодном шламе (практически все примеси); только олово осаждается вместе со свинцом и освободиться от него при электролизе трудно.

До последнего времени для электролиза применяли электролит из водного раствора кремнефтористоводородной кислоты (H_2SiF_6) и кремнефтористого свинца (PbSiF_6) [21]. Получение электролита в данном случае связано с применением ядовитой и агрессивной плавиковой кислоты.

Предложение осажать свинец электролизом растворов PbSiF_6 и $\text{Pb}(\text{BF}_4)_2$ было сделано Лейксом в 1886 г., в 1904 г. А. Г. Беттс ввел в практику рафинирование в кремнефтористоводородных растворах [8].

На свинцовом заводе Сан-Гавино (Монреаль) свинец (менее 0,005% Bi), очищенный от меди, подвергают огневому рафинированию, тогда как свинец, содержащий висмута более 0,005%, поступает на электрохимическое рафинирование. На заводе получают около 15 т в сутки электролитного свинца.

На заводе Трейл подлежащий рафинированию свинец после обезмеживания отливают в аноды в виде пластин с заплечиками, которыми они опираются на борта ванны. Размеры анодов 767x667 мм при толщине 29 мм, вес их 193 кг. Чем больше примесей содержит свинец, тем тоньше отливают аноды. В качестве катодов употребляют свинцовые листы толщиной 1 мм, которые на 10 мм шире и длиннее анодов. Ванны из железобетона изнутри покрыты кислотоупорной футеровкой из асфальта или из винилпласта. В ванне помещается 20 анодов и 21 катод. Электроды включены параллельно, а ванны последовательно.

Анодная плотность тока составляет 120—150 А/м², напряжение 0,50—0,55 В, выход по току 96—97% и расход энергии 190 кВт·ч/т катодного свинца. Шлам содержит 12—20% Pb, 4—5% Ag, 6—15% Cu, 25—30% Sb и 9—15% As. После промывки водой его плавят в отражательной печи. Металл подвергают окислительной плавке для отделения свинца, сурьмы и меди. Пыль и шлак перерабатывают с получением сурьмянистого свинца. Такой же способ электролиза применяется на заводе Падерно-Дуньяно в Милане. Производительность завода 10000 т свинца в год; чистота свинца 99,995% [22].

Электролитическому рафинированию подвергают свинец и на Шеньянском заводе в КНР [23]. Аноды отливают из обезмеженного свинца, содержащего 98,7% Pb, 0,32% Sb, 0,009% Cu, 0,269% As, 0,007% Sn. Электролиз ведут в 252 ваннах размером 3,2x0,76x1,05 м. В каждой ванне 33 анода и 34 катода; плотность тока 160—220 А/м², напряжение 0,42 В, расход электроэнергии 108 кВт·ч/т свинца и кремнефтористоводородной кислоты 2 кг/т. Выход по току 97%, получающийся металл содержит 99,997% Pb. Выход шламов составляет 1,2% от свинца. Их перерабатывают с целью извлечения содержащихся в них металлов. Возможность одной операцией очистить свинец от всех содержащихся в нем примесей и извлечь их из небольшого количества шламов определяет значительное преимущество электролитического рафинирования, которое наряду с непрерывным будет завоевывать в металлургии свинца все большее признание.

Перерабатываемый свинец расплавляют и отливают в аноды в виде пластин с заплечиками, которыми они опираются на борта ванны. Обычно толщина анодов 20-40 мм, а их масса колеблется в пределах 150-200 кг. Толщина анодов зависит от количества примесей, содержащихся в свинце: чем больше примесей, тем меньшей толщины делают анод.

В качестве катодов употребляют свинцовые листы толщиной 1 мм. Катоде на 10-12 мм больше по ширине и длине, чем аноды. Это делают для того, чтобы избежать образования дендритных отложений по краям катода.

Электролитную ванну делают из бетона и железобетона и покрывают изнутри кислотоупорной футеровкой: винилпластом, гудроном, кислотостойкой плиткой и др. Объем ванн от 1,2 до 6,3 м³. Они группируются в блоки, расположенные на одном уровне или в виде каскада.

Электрохимическое рафинирование свинца проводят при сравнительно низкой плотности тока, поддерживая на аноде от 100 до 220-240 А/м². Расстояние между поверхностями электродов 40-50 мм. Напряжение на ванне при этом составляет 0,35-0,50 В, поднимаясь по мере срабатывания анодов до 0,6-0,8 В. Чем чище анодный

свинец, тем интенсивнее можно проводить электролиз. Температуру электролита обычно поддерживают на уровне 35-40°C без подогрева.

В рассматриваемом процессе достигается высокий выход по току: 96-97%. Вследствие большого электрохимического эквивалента свинца и низкого напряжения на ванне расход электроэнергии небольшой— всего 110-150 (иногда до 200) кВт·ч на 1 т свинца.

Электролитическое рафинирование экономически выгодно проводить при небольшом содержании примесей в черновом металле, в основном, от благородных металлов и висмута на небольших по мощности заводах. Из-за малой интенсивности процесса, сложной схемы переработки электролитного шлама, больших капиталовложений, высокой токсичности электролита, при большом содержании в черновом свинце разнообразных примесей электролитическое рафинирование нецелесообразно проводить в больших масштабах.

Электрохимическая переработка свинцового сырья. В РФ и странах СНГ основной способ переработки вторичного свинца (в частности СКА) — пирометаллургический. Он изложен выше. Моральная и физическая изношенность используемого оборудования и очистных сооружений приводит к образованию значительного количества высокотоксичных отходов, поступающих в окружающую среду в виде свинецсодержащей пыли и шлаков. Например, концентрация свинцовой пыли на границе санитарно-защитной зоны наиболее крупного предприятия по переработке вторичного свинца Украины (г. Константиновка) ЗАО «Свинец» при производительности 12 тыс. т свинца в год достигает 1,2— 1,41 ПДК (валовый выброс 24-46 т/год) [24]. Все это требует внедрения новых технологий переработки вторичного свинца, способных снизить нагрузку на окружающую среду.

Одна из таких технологий — электрохимическая, основанная на химическом либо электрохимическом растворении свинецсодержащих компонентов аккумуляторов и извлечении свинца из электролита методом электрорафинирования и электроэкстракции.

Существует несколько схем электрохимической переработки СКА: с предварительным разделением на металлическую и сульфатно-оксидную фракции (в этом случае металлическая фракция подлежит металлургической переплавке, а сульфатнооксидная — растворению после предварительной обработки подходящим реагентом с последующим извлечением свинца из полученного электролита электрорафинированием) и без разделения (извлечение свинца из свинцовых пластин (анодов) электрорафинированием или после измельчения пластин, обработки и растворения электроэкстракцией).

С экологической и технологической точек зрения электрохимические технологии обладают рядом преимуществ по сравнению с пирометаллургическими. Товарными продуктами, получаемыми в процессе металлургического передела, являются свинцово-сурьмянистые сплавы марок ССуА (ГОСТ 1292-81) [25], УС-1 по ТУ 48-6-98-86 [26] и свинец марки С2 (ГОСТ 3778-98) [27], в то время как при электрохимической переработке возможно получение только чистого свинца марок С1 и С2, так как ухудшающие качество металлы-примеси либо выпадают из электролита в виде шлама, либо переходят в его раствор и на катоды не осаждаются. Выход по продукту при пирометаллургической переработке составляет 50-70%, при электрохимической — 75-90%.

Все электрохимические технологии включают предварительную разделку аккумуляторных блоков на органическую и металлические фракции, что исключает

процесс сжигания органики и выделения образующихся в этом процессе вредных веществ.

Процесс электрохимической переработки сопровождается гораздо меньшими выбросами свинца в атмосферу: при пирометаллургическом способе выброс свинца в виде пыли составляет в среднем 2 кг/т, а при электрохимическом в виде аэрозоля — 0,01 кг/т [28].

Следует указать, что переработка свинцовых аккумуляторных пластин электрорафинированием сопровождается очень малым выделением газообразных продуктов электролиза на электродах, так как анод является растворимым, кислород на нем не выделяется, как и водород на катоде вследствие высокого выхода свинца по току. Поэтому барботажный унос вредных веществ из электролита невелик. Например, удельные выбросы фтористых соединений (фтористого водорода и тетрафторида кремния) с поверхности кремнефтористо-водородного электролита составляет 0,004-0,006 г/(м²·с) в зависимости от концентрации кремнефтористоводородной кислоты в электролите, что в 1,5-3 раза меньше, чем при свинцевании с нерастворимыми анодами [29].

Н. В. Исаевой и А. И. Сердюком установлено, что выбросы газообразных загрязняющих веществ с поверхности электролита не зависят от плотности тока при электролизе, поэтому повышение его скорости за счет увеличения электродной плотности тока приводит в итоге к снижению валовых выбросов загрязняющих веществ с поверхности электролита (в среднем в 1,5-2 раза) [30].

При электрохимической переработке свинца в промышленности обычно применяют следующие растворы: кремнефтористоводородные, борфтористоводородные и сульфаминовые. Из них свинец выделяется на катоде в форме плотного крупнокристаллического осадка, склонного к дендритообразованию по кромкам электродов, поэтому для получения плотных мелкокристаллических осадков электролиз ведут с добавкой в электролит поверхностно-активных веществ.

Применение растворов борфторводородной кислоты (НВF₄) имеет некоторые преимущества перед кремнефторводородными растворами, рассмотренными выше, однако использование первых из них сравнительно ограничено вследствие дефицитности борного ангидрида (В₂О₃) и его достаточно высокой стоимости.

Известен способ извлечения свинца из отходов аккумуляторных батарей, который включает электролитическое осаждение свинца из щелочных растворов на асимметричном импульсном токе с варьированием периодической последовательности пакетов положительных n⁺ и отрицательных n⁻ импульсов тока, причем количество импульсов в пакете выбирают из n⁺=20 и интервала 1 ≤ n⁻ ≤ 10. Обеспечивается повышение степени извлечения свинца из щелочных растворов, снижение экономических затрат, экологическая безопасность и возможность безотходного производства [31].

В работе [32] указано, что сумма токсичных выбросов фторидов и свинца с поверхности борфтористоводородного электролита при переработке утильных свинцово-кислотных аккумуляторов, в 11-12 раз ниже, чем для кремнийфтористоводородного электролита. Это можно объяснить меньшим испарением с поверхности электролита борфтористоводородной кислоты по сравнению с кремнийфтористоводородной кислотой.

Таким образом, к сожалению, на сегодняшний день нет экологически чистой и рентабельной технологии, которая позволила бы переработать исчерпавшие свой срок аккумуляторные батареи, с получением продуктов надлежащего качества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Отчет об обращении с отходами № 128» [Электронный ресурс] : Отчетно-статистическая документация на 2019 год : №128 от 29.11.2017 г. – Режим доступа : http://glavstat.govdnr.ru/respond/blanki_19_ur/okr_sreda/1-otkhody-godovaja.doc. – Заглавие с экрана. – Дата обращения 11.12.2018.
2. Процессы и аппараты цветной металлургии: учебник для вузов / С. С. Набойченко, Н. Г. Агеев, А. П. Дорошкевич [и др.]. – Екатеринбург : УГТУ, 1997. – 648 с.
3. Серебряный Я. Л. Электроплавка медно-никелевых руд и концентратов : учебник / Я. Л. Серебряный. – Москва : Металлургия, 1974. – 248 с.
4. Хьюз С. Технология Ausmelt – современная технология получения свинца [Текст] / С. Хьюз, Д. Фогарти // Цветная металлургия : науч.-техн. журн. – 2006. – № 11. – С. 12.
5. Бессер А. Д. Анализ современного состояния переработки использованных свинцово-кислотных батарей / А. Д. Бессер, В. С. Сорокина, А. А. Погосян // Цветные металлы. – 2006. – № 2. – С. 23-29.
6. Изучение растворимости сульфата свинца и хлорида серебра в растворах хлористого натрия / Н. В. Миронкина, О. Н. Вязовой, А. Д. Михнев, А. И. Рюмин // Вестник СибГАУ. – 2007. – № 2. – С. 80-82.
7. Ягодин Г. А. Технология редких металлов в атомной технике : учеб. пособие для вузов / Г. А. Ягодин, О. А. Синегрибова, А. М. Чекмарев ; под ред. Б. В. Громова. – Москва : Атомиздат, 1974. – 344 с.
8. Баймаков Ю. В. Электролиз в гидрометаллургии / Ю. В. Баймаков, А. И. Журин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1977. – 336 с.
9. Металлургия свинца : учеб. пособие / Ю. П. Романтеев, А. Н. Федоров, С. В. Быстров, А. А. Комков. – Москва : МИСиС, 2005. – 215 с.
10. Прогрессивные методы обогащения и технологии глубокой переработки руд цветных, редких и платиновых металлов : Плаксинские чтения 2006 : материалы Междунар. совещания / [отв. ред. Т. В. Чекушина]. – Красноярск, 2006. – 322 с.
11. Основы гидрометаллургии : учеб. пособие / И. Ю. Кольчурина, О. И. Нохрина, В. В. Руднева, В. М. Федотов ; Сибир. гос. индустриал. ун-т. – Новокузнецк, 2008. – 226 с.
12. Теоретические основы гидрометаллургических процессов. Экстракционные и ионообменные процессы : учеб. пособие. / В. А. Луганов, А. О. Байконурова, Н. М. Комков, Е. Н. Сажин. – Усть-Каменогорск : ВКГТУ, 2004. – 104 с.
13. Уразов Г. Г. Исследование реакции замещения $2 AgCl + Pb = PbCl_2 + 2Ag$ методом термического анализа тройной системы Ag - Pb - Cl / Г. Г. Уразов, А. С. Карнаухов // Журнал неорганической химии. – 1956. – Т. 1 – № 4. – С. 731.
14. Пат. 2361937 Российская Федерация, МПК C22B 11/00. Способ подготовки упорных сульфидных руд и концентратов к выщелачиванию / Секисов А. Г., Резник Ю. Н., Шумилова Л. В. ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Читинский государственный университет ; заявл. 12.06.07 ; опубл. 20.07.09. – 3 с.
15. ГОСТ 3778-65. Свинец. – Взамен ГОСТ 3778-56 ; введ. 1956-07-01.
16. Ситтиг М. Извлечение металлов и неорганических соединений из отходов : справочник / М. Ситтиг, Н. М. Эмануэль. – Москва : Металлургия, 1985. – 408 с.
17. Шевельков В. В. Материаловедение : учеб. пособие. / В. В. Шевельков, А. С. Былеев. – Псков : ППИ, 2006. – 97 с.
18. Уткин Н. И. Металлургия цветных металлов : учеб. для техникумов / Н. И. Уткин. – Москва : Металлургия, 1985. – 440 с.
19. Воробьева Г. Я. Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств / Г. Я. Воробьева. – Изд. 2-е пер. и доп. – Москва : Химия, 1975. – 816 с.
20. Лотош В. Е. Переработка отходов природопользования / В. Е. Лотош ; Урал. гос. ун-т путей сообщения. – Екатеринбург : Изд-во Ургупс, 2002. – 463 с.
21. Свойства электролитов : справочное издание / И. Н. Максимова, Ч. С. Пак, Н. Н. Правдин [и др.]. – Москва : Металлургия, 1987. – 128 с.
22. Романтеев Ю. П. Металлургия свинца : учеб. пособие / Ю. П. Романтеев. – Москва : МИСиС, 2005. – 215 с.
23. Аккуратова Т. А. Основные технико-экономические показатели работы предприятий цветной металлургии / Т. А. Аккуратова, Л. В. Андреева, Е. А. Блом. – Москва, 1979. – 103 с.
24. Исаева-Парцвания Н. В. Повышение экологической безопасности при электрохимической переработке свинцово-кислотных аккумуляторов в кремнефтористых электролитах : дис. ... канд. техн. наук : 21.06.01 / Исаева-Парцвания Нина Владимировна ; Донбас. нац. акад. строительства и архитектуры. – Макеевка, 2006. – 217 с.

25. ГОСТ 1292-81. Сплавы свинцово-сурьмянистые. Технические условия. – Взамен ГОСТ 1292-74 ; введ. 1982–01–01. – Москва : ИПК Изд-во стандартов, сор. 2000. – 12 с.
26. ГОСТ 1293.16-93. Сплавы свинцово-сурьмянистые. Методы определения серы. – введ. 1998–01–01. – Москва : ИПК Изд-во стандартов. . – 19 с.
27. ГОСТ 3778-98. Свинец. Технические условия. – Взамен ГОСТ 3778-77 ; введ. 2001–07–01. – Москва : ИПК Изд-во стандартов, сор. 2001. – 11 с.
28. Гальванические покрытия в машиностроении : справочник в 2 т. Т. 1 / [В. И. Игнатьев, Н. С. Ионичева, А. В. Марейчев и др.] ; под ред. М. А. Шлугера. – Москва : Машиностроение, 1985. – 240 с.
29. Назарова В. В. Екобезпечна ресурсозберігаюча технологія вилучення свинцю з брухту свинцево-кислотних акумуляторів / В. В. Назарова, О. І. Сердюк // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали Всеукр. міжвуз. наук.-техн. конф. (Суми, 19-23 квіт. 2010 р.) / редкол. : О. Г. Гусак, В. Г. Євтухов. – Суми : СумДУ, 2010. – Ч. 3. – С. 156-157.
30. Исаева Н. В. Проблемы и перспективы электрохимической переработки свинцово-кислотных аккумуляторов (обзор) / Н. В. Исаева, А. И. Сердюк // Экологические технологии и ресурсосбережение. – 2005. – № 5. – С. 48-55.
31. Пат. 2505613 Российская Федерация, МПК C25C 1/18. Способ электрохимического извлечения свинца из свинцово-кислотных отходов аккумуляторных батарей : / Спиридонов Б. А., Небольсин В. А. ; заявитель и патентообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования «Воронеж. гос. техн. ун-т» ; опубл. 27.01.14. – 4 с.
32. Сердюк А. И. Повышение экологической безопасности при переработке отработанных свинцово-кислотных аккумуляторов в борфтористоводородном электролите / А. И. Сердюк, М. М. Ялалова // Строительство и техногенная безопасность. – 2018. – № 10 (62). – С.201-208.

Поступила в редакцию 27.05.2019 г.

PROSPECTS FOR PROCESSING OF RECLAIMING LEAD-ACID BATTERIES

M. Yalalova, A. Serdyuk

The known methods of recycling of used lead-acid batteries are considered. The advantages and disadvantages of pyrometallurgical, hydrometallurgical and electrochemical methods of disposing of waste batteries are shown.

Keywords: disposal, lead-acid accumulators, pyrometallurgy, hydrometallurgy, electroroffination, electrochemistry.

Ялалова Маргарита Маратовна

ассистент кафедры техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», ДНР, г. Макеевка.
E-mail: yalalova-rita@mail.ru

Yalalova Margarita Maratovna

Assistant Lecturer at Department of Technospheric security of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka.

Сердюк Александр Иванович

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», ДНР, г. Макеевка.
E-mail: ecoalserdiuk@rambler.ru

Serdyuk Alexander Ivanovich

Doctor of Chemical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Technospheric security of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka.

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 Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

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

Danilov Vladimir

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:

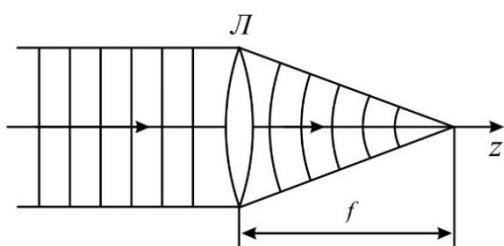


Рис. 4. Действие линзы на плоскую волну

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. – № 2

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. 9,99
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.