

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

# Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ  
ЖУРНАЛ

Основан в 1997 году,  
«Серия Г: Технические науки»  
основана в 2018 году

---

Серия Г:  
Технические  
науки

---

1 / 2023

---

**Редакционная коллегия журнала**

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

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

**Зам. главного редактора – канд. техн. наук И.А. Третьяков.**

**Ответственный секретарь – канд. техн. наук Е.Д. Пометун.**

**Члены редколлегии:** канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. **П.В. Асланов**; д-р техн. наук, проф. **С.А. Горожанкин**; канд. техн. наук, доц. **В.Д. Коренев**; канд. техн. наук, ст. науч. сотр. **А.А. Курушин**; канд. техн. наук, доц. **И.А. Молоковский**; канд. техн. наук, доц. **В.В. Паслен**; канд. техн. наук **Е.М. Силенко**; канд. физ.-мат. наук, доц. **В.И. Тимченко**; д-р техн. наук, доц. **К.А. Вытовтов**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Ермоленко**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Завадская**; д-р техн. наук, доц. **С.А. Зори**; академик РАН, д-р техн. наук, проф. **И.А. Соколов**; д-р техн. наук, проф. **М.Н. Чепцов**; д-р техн. наук, проф. **А.Б. Бирюков**; канд. техн. наук, доц. **С.В. Гридин**; д-р техн. наук, проф. **С.М. Сафьянц**; д-р техн. наук, проф. **В.К. Толстых**; канд. техн. наук, доц. **О.Г. Шелехова**; д-р техн. наук, проф. **Г.В. Аверин**; канд. техн. наук, доц. **Т.С. Башевая**; д-р техн. наук, проф. **С.В. Борщевский**; д-р техн. наук, проф. **Н.Г. Насонкина**; д-р хим. наук, проф. **А.И. Сердюк**.

**The Editorial Board of the journal**

**«Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences»**

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

**The Deputy of the Editor-in-Chief – Cand. of tech. I.A. Tretiakov.**

**Assistant Editor – Cand. of tech. E.D. Pometun.**

**The Members of the Editorial Board:** Cand. of phys. and math., senior researcher **P.V. Aslanov**; Dr. of tech., prof. **S.A. Gorozhankin**; Cand. of tech., docent **V.D. Korenev**; Cand. of tech., senior researcher **A.A. Kurushin**; Cand. of tech., docent **I.A. Molokovskii**; Cand. of tech., docent **V.V. Paslen**; Cand. of tech. **E.M. Silenko**; Cand. of phys. and math., docent **V.I. Timchenko**; Dr. of tech., docent **K.A. Vytovtov**; Cand. of tech., docent **T.V. Ermolenko**; Cand. of tech., docent **T.V. Zavadskaia**; Dr. of tech., docent **S.A. Zori**; RAS Academician, Dr. of tech., prof. **I.A. Sokolov**; Dr. of tech., prof. **M.N. Cheptsov**; Dr. of tech., prof. **A.B. Biriukov**; Cand. of tech., docent **S.V. Gridin**; Dr. of tech., prof. **S.M. Safiants**; Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh**; Cand. of tech., docent **O.G. Shelekhova**; Dr. of tech., prof. **G.V. Averin**; Cand. of tech., docent **T.S. Bashevaia**; Dr. of tech., prof. **S.V. Borshchevskii**; Dr. of tech., prof. **N.G. Nasonkina**; Dr. of chem., prof. **A.I. Serdiuk**.

**Адрес редакции:** 283001, Российская Федерация, ДНР, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.

**Тел.:** +7 (856) 302 07 81      **E-mail:** [vestnik.donnu.g@donnu.ru](mailto:vestnik.donnu.g@donnu.ru)      **URL:** <http://donnu.ru/vestnikG>

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**Перечень ВАК**) (Приказы МОН ДНР №440 от 06.03.2020 г., №42 от 26.01.2021 г.) по следующим группам научных специальностей (специальностям): **05.11.00** – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; **05.12.00** – Радиотехника и связь; **05.13.00** – Информатика, вычислительная техника и управление; **05.14.04** – Промышленная теплоэнергетика; **05.23.19** – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства.

Журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему **РИНЦ** (Лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г. в ред. от 27.03.2019 г.): [http://elibrary.ru/title\\_about\\_new.asp?id=69984](http://elibrary.ru/title_about_new.asp?id=69984)

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

*Печатается по решению Ученого совета ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»:*

*Протокол №2 от 31.03.2023 г.*

# **Вестник Донецкого национального университета**

**Серия Г: Технические науки**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ,  
СЕРИЯ Г ОСНОВАНА В 2018 ГОДУ

Номер посвящён 5-летию  
деятельности редакции научного  
журнала «Вестник ДонНУ».  
Серия Г: Технические науки»

**№ 1/2023**

## **СОДЕРЖАНИЕ**

Вступительное слово	3
---------------------	---

### **ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ**

Павловская К.А., Червинский В.В. Маршрутизация в сетях MANET на основе муравьиных алгоритмов с учетом энергосбережения	4
--	---

Добромуслов В.С. Метод эффективной диэлектрической проницаемости для анализа мод шепчущей галереи в дисковых диэлектрических резонаторах	11
--	----

Стрижко М.А., Червинский В.В., Турупалов В.В. Модуль интеллектуального анализа сетевого трафика в системах обнаружения вторжений на базе совокупности нейронных сетей	23
---	----

### **ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ**

Третьяков И.А., Данилов В.В., Борищевский С.В. Элементы устройств вычислительной техники для АСНиК контроля радиообстановки на основе эхо-эффекта	34
---	----

Аверин Г.В., Звягинцева А.В., Самолихин В.В. Аналитические и вероятностные модели при расчетах тепловлагопереноса в горных выработках	40
---	----

### **ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

Начебия Н.С., Бирюков А.Б. Анализ расчетных методов и математических моделей теплообменных процессов в насадках регенеративных горелок	50
--	----

Бирюков А.Б., Турулина Ю.О. Определение оптимального шага укладки заготовок в печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности	57
--	----

### **ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

Хуррамов М.Г. Исследование ресурсосберегающих способов получения фильтрующих материалов для тонкой очистки воздуха и их испытание	64
---	----

### **ИНФОРМАЦИОННАЯ РУБРИКА**

5-летию деятельности редакции научного журнала «Вестник ДонНУ». Серия Г: Технические науки»	70
---	----

Правила для авторов	92
---------------------	----

# Bulletin of Donetsk National University

**Series G: Technical sciences**

**SCIENTIFIC JOURNAL**

FOUNDED IN 1997,  
SERIES G FOUNDED IN 2018

Number dedicated to the 5th anniversary of the editorial office of the scientific journal "Bulletin of DonNU. Series G: Technical Sciences"

**№ 1/2023**

## CONTENTS

Opening remark	3
----------------	---

### ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT ENGINEERING AND COMMUNICATION

Pavlovskaya K.A., Chervinskii V.V. Routing in MANET networks based on ant colony algorithms taking into account energy saving	4
---	---

Dobromyslov V.S. Effective permittivity method for the whispering gallery modes analysis in disk dielectric resonators	11
--	----

Strizhko M.A., Chervinskii V.V., Turupalov V.V. A module for intelligent network traffic analysis in intrusion detection systems based on a set of neural networks	23
--	----

### INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

Tretiakov I.A., Danilov V.V., Borshchevskii S.V. Elements of computing devices for ASRS control of radio placement based on the echo effect	34
---	----

Averin G.V., Zviagintseva A.V., Samolikhin V.V. Analytical and probabilistic models when calculating heat and moisture transfer in mine workings	40
--	----

### ENERGETICS AND ELECTRICAL ENGINEERING

Nachkebiia N.S., Biriukov A.B. Analysis of calculation methods and mathematical models of heat exchange processes in the nozzles of regenerative burners	50
--	----

Biriukov A.B., Turulina IU.O. Determination of rational mode parameters of a tune furnace with a mechanized bottom working under conditions of variable productivity	57
--	----

### TECHNOSPHERE SAFETY

KHurramov M.G. Study of resource-saving methods for obtaining filter materials for fine air cleaning and their testing	64
--	----

### INFORMATION SECTION

The 5th anniversary of the editorial office of the scientific journal "Bulletin of DonNU. Series G: Technical Sciences"	70
---	----

Instructions for authors	92
--------------------------	----

## Уважаемые коллеги!

С радостью сообщаем Вам, что наш Журнал отмечает свой первый юбилей – 5 лет, чему посвящается данный номер журнала. Пять лет своего существования дались нам не так уж и просто, подробнее об этом в статье «5-летию деятельности редакции научного журнала Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки» в конце номера.

Кроме того, Постановлением Правительства Российской Федерации от 18 марта 2023 г. № 415 «Об особенностях присуждения ученых степеней и присвоения ученых званий, предусмотренных системой государственной научной аттестации Российской Федерации ...» определено:

1. *Наш Журнал признается соответствующим требованиям, предъявляемым к рецензируемым научным изданиям Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций, до 31 декабря 2023 г.*

2. *Для лиц, признанных гражданами Российской Федерации в соответствии с частью 1 статьи 5 Федерального конституционного закона «О принятии в Российскую Федерацию Донецкой Народной Республики и образовании в составе Российской Федерации нового субъекта - Донецкой Народной Республики» и «О принятии в Российскую Федерацию Луганской Народной Республики и образовании в составе Российской Федерации нового субъекта - Луганской Народной Республики», опубликовавших основные научные результаты диссертаций и научные труды в нашем Журнале до 31 декабря 2023 г., указанные публикации признаются в качестве публикаций в рецензируемых научных изданиях в Российской Федерации без ограничения срока.*

Надеемся, что это привлечет новых авторов, а также на сохранение сотрудничества с нашими постоянными авторами.

Главный редактор



В.В. Данилов

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА,  
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

УДК 621.395

МАРШРУТИЗАЦИЯ В СЕТЯХ MANET НА ОСНОВЕ МУРАВЬИНЫХ  
АЛГОРИТМОВ С УЧЕТОМ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

© 2023 Павловская К.А., Червинский В.В.

В настоящей работе предложен модифицированный алгоритм AntHocNet, учитывающий энергопотребление элементов сети и имеющий цель обеспечить сбалансированность электропотребления узлов сети, и соответственно, увеличить время жизни узлов на аккумуляторах.

**Ключевые слова:** сеть, алгоритм, маршрутизация, мобильность, энергопотребление, трафик, муравьиная колония.

**Введение.** Сегодня подавляющее большинство наземных мобильных беспроводных сетей связи имеют фиксированную инфраструктуру и соединены между собой с помощью различных, как правило, проводных или радиорелейных каналов передачи данных. В последнее десятилетие большое внимание уделяется созданию мобильных пакетных радиосетей, которые не имеют фиксированной инфраструктуры, таких как: сети стационарных (AdHoc) и мобильных абонентов (MANET).

Такие сети являются самоорганизующимися, поскольку их узлы являются не только оконечными пользовательскими терминалами, но и ретрансляторами-маршрутизаторами, которые ретранслируют пакеты других абонентов и участвуют в нахождении маршрутов к ним, следовательно эти сети способны к самоорганизации [1]. Технология MANET базируется на большом количестве протоколов маршрутизации со сложными алгоритмами для любых ситуаций. К таким протоколам относятся: DSR, AODV, OLSR и т.д. Каждый из этих протоколов имеет свой алгоритм поиска маршрута, передачи данных, а так же собственную структуру данных.

**Постановка проблемы.** Узлы в MANET могут динамически присоединяться и покидать сеть. Благодаря гибким сетевым возможностям и отсутствию инфраструктуры технология широко используется в военных и гражданских сферах, обеспечивая беспроводную связь между мобильными устройствами. Из-за ограниченных ресурсов, таких как мощность, полоса пропускания, производительность и объемы памяти узлов, а также их мобильность, важной задачей является уменьшение накладных расходов на маршрутизацию. При этом одной из наиболее важных проблем является увеличение времени жизни сети и энергосбережение узлов, поскольку они используют аккумуляторы с ограничениями по мощности.

В последние годы проблеме энергосбережения в MANET уделяется много внимания. Методы управления энергопотреблением преследуют две основные цели [2]:

- минимизация общего энергопотребления в сети;
- минимизация энергопотребления узлами.

Первый метод имеет цель продление общего срока службы сети, второй – продление срока службы отдельного узла. Общее снижение энергопотребления может быть достигнуто с использованием муравьиных алгоритмов. Для этого необходимо,

чтобы протокол маршрутизации использовал муравьев, которые будут учитывать различные факторы, такие как мощность, потребляемая при передаче пакета, остаточная емкость аккумулятора узла, в результате чего станет возможным увеличить срок службы аккумулятора узлов за счет сокращения повторяющегося использования подмножества узлов. Протокол энергоэффективной маршрутизации на основе муравьиного алгоритма должен выбирать маршрут не только в зависимости от количества переходов между узлами, но также от энергии, потребляемой при передаче пакетов, и остаточной энергии узлов, что поможет сбалансировать энергопотребление узлов и продлить срок службы всей сети. Использование эффективного подхода может минимизировать потребление энергии во всей сети и максимально продлить срок службы сети.

**Основная часть.** Рассмотрим поэтапно шаги модификации протокола AntHocNet для управления энергопотреблением узлов сети MANET.

На первом этапе происходит генерация феромона. Узким местом в сетях MANET является энергопотребление мобильных узлов. Если на узле садится аккумулятор, то проходящий через этот узел маршрут сразу становится недействительным, что приводит к сбою передачи данных и увеличению задержки передачи. Чтобы муравьиный алгоритм мог учитывать вопросы энергопотребления при инициализации каждого феромона узла на маршруте необходимо ввести учет минимальной остаточной энергии маршрута, средней энергии и уровня энергопотребления. Оставшийся срок службы узлов ( $RLT_n$ ) и оставшийся срок службы каналов ( $RLT_1$ ) определяются на основе прогноза состояния сети, в то время как оставшаяся энергия и средняя энергия основываются на показателях текущего состояния сети. Рассмотрим эти показатели, взяв за основу модель энергопотребления, приведенную в [3].

Рассмотрим методику расчета оставшегося срока службы узлов. Предполагается, что узел  $S$  отправляет данные объемом  $k$  бит узлу  $D$ , находящемуся на расстоянии  $d$ . Энергия узла в основном расходуется на передачу и прием данных. Когда один пакет передается от узла  $i$  к узлу  $j$  следующего перехода, потребляемая энергия равна:

$$c(i, j) = 2E_{pb} \cdot k + E_{sb} \cdot j \cdot d^2,$$

где  $E_{pb}$  – потребление энергии узлом при обработке одного бита данных;

$E_{sb}$  – энергия, потребляемая усилителем для отправки одного бита данных;

$k$  – количество пересылаемых бит данных;

$d$  – расстояние между узлами.

Энергия, потребляемая при прохождении каждого маршрута равна:

$$c(S, D) = \sum_{i=S}^{D-1} c(i, i+1),$$

При передаче данных постоянно потребляется энергия узла. Энергия узла в любой момент может быть выражена как

$$E_i(t) = E_i(0) - c(i, j).$$

Оставшееся время жизни узла  $i$  можно определить как:

$$LN_i = \frac{E_i}{r_i}.$$

где  $r_i$  – энергия, потребляемая узлом в единицу времени:

$$r_i(t) = \frac{E_i(t + \Delta t) - E_i(t)}{\Delta t}.$$

Рассмотрим оставшийся срок службы каналов (линий связи). Воспользуемся следующим методом расчета оставшегося срока службы каналов: предполагая, что скорость движения, направление движения и географическое положение каждого узла сети известны, оставшийся срок службы канала между узлом  $i$  и узлом  $j$  рассчитывается следующим образом:

$$LL_i = \frac{-(ab + cd) + \sqrt{(a^2 + c^2)r^2 - (ad - cb)^2}}{a^2 + c^2},$$

где  $r$  – максимальное коммуникационное расстояние между узлами в сети.

$$a = v_i \cos \Theta_i - v_j \cos \Theta_j,$$

$$b = x_i - x_j,$$

$$c = v_i \sin \Theta_i - v_j \sin \Theta_j,$$

$$d = y_i - y_j,$$

где  $\Theta$  – коэффициент смещения.

Более длительный оставшийся срок службы указывает на более стабильный канал. В динамически изменяющейся сети стабильный канал является более предпочтительным, поскольку позволяет избежать повторной передачи данных, повысить эффективность передачи, снизить энергопотребление и уменьшить частоту поиска маршрута.

Предложенная оценка оставшегося срока службы узлов и каналов основана на прогнозировании состояния сети, в то время как остаточная энергия и средняя энергия являются оценками текущего состояния сети. Инициализация феромоном указывает качество каждого пути, полученного методом случайного выбора F-муравьев и обновления состояния В-муравьями после окончания фазы поиска маршрута. Феромон образуется по следующему уравнению:

$$\tau_0 = \frac{E_{\min} \cdot E_{avg}}{L_{route}} \cdot T,$$

где  $L_{route}$  – длина маршрута, определяется как сумма длин всех хопов (скакков);  $E_{\min}$  – минимальная остаточная энергия из всех узлов, к которым необходимо получить доступ на маршруте, определяется по формуле:

$$E_{\min} = \min E_i (i \in route).$$

где  $T$  – минимальный оставшийся срок службы из всех узлов и каналов, к которым необходимо получить доступ на маршруте:

$$T = \min(\min(ZN), \min(ZL)).$$

где  $E_{avg}$  – отношение общей остаточной энергии маршрута к длине маршрута:

$$E_{avg} = \frac{\sum E_i}{L_{route}}.$$

На следующем шаге происходит обновление феромона.

Обновление феромона означает, что после того, как каждый муравей успешно находит узел назначения или данные передаются по маршруту, феромон откладывается на маршруте. Со временем феромон будет испаряться, что помогает найти оптимальный маршрут и ускорить сходимость алгоритма.

Модификация алгоритма заключается в том, что при обновлении феромона учитывается остаточная энергия и расстояние до узла, для чего используется механизм вознаграждения и наказания. Когда F-муравей успешно находит маршрут, B-муравей, сгенерированный узлом назначения, возвращается по первоначальному маршруту и обновляет феромон (награда). Когда муравью не удается найти путь, последний узел генерирует обратного B-муравья, который возвращается по первоначальному пути и обновляет феромон (наказание). Правила обновления следующие:

$$\tau(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau(t) + \rho \cdot \Delta \tau,$$

$$\Delta \tau = RS \cdot \frac{E_{min}}{L_{route}},$$

где  $RS$  – результат нахождения маршрута.

Если муравей проходит успешно,  $RS = 1$ ; в противном случае  $RS = 0$ . Если в течение длительного времени муравьи не проходят по определенному маршруту, это указывает на то, что или на маршруте низкий уровень феромона, или маршрут является неудачным. Поэтому феромон должен периодически испаряться.

$$\tau(t + t_0) = \rho \cdot \Delta \tau,$$

где  $t_0$  - период испарения.

Когда узел завершает передачу данных, он запускает таймер и начинает испарять феромон.

Проведем моделирование работы модифицированного алгоритма. Для моделирования и проверки модифицированного алгоритма оптимизации муравьиной колонии используем пакет программ для инженерных расчетов MATLAB.

Сценарий моделирования задается для прямоугольной области размером 100 м × 100 м. Координаты узла-источника - (0, 0), а координаты узла назначения - (100, 100). Внутри прямоугольной области равномерно распределены 40 узлов MANET. Узел-источник периодически транслирует муравьев для обнаружения маршрута, и каждый муравей выбирает маршрут в соответствии с алгоритмом AntHocNet. Предполагается, что все узлы имеют одинаковые коммуникационные отношения, все узлы изначально имеют одинаковый уровень заряда аккумулятора (энергии), а потребление энергии в основном определяется расстоянием между узлами.

Модифицированный протокол маршрутизации, основанный на AntHocNet, с учетом энергопотребления узлов, использует показатели энергопотребления для вычисления значения феромона. Целью такой модификации является увеличение времени функционирования всех узлов.

На рисунке 1 показаны результаты моделирования – графики зависимости доли узлов с полностью разряженным аккумулятором от времени моделирования для двух протоколов – AntHocNet и модифицированного AntHocNet.

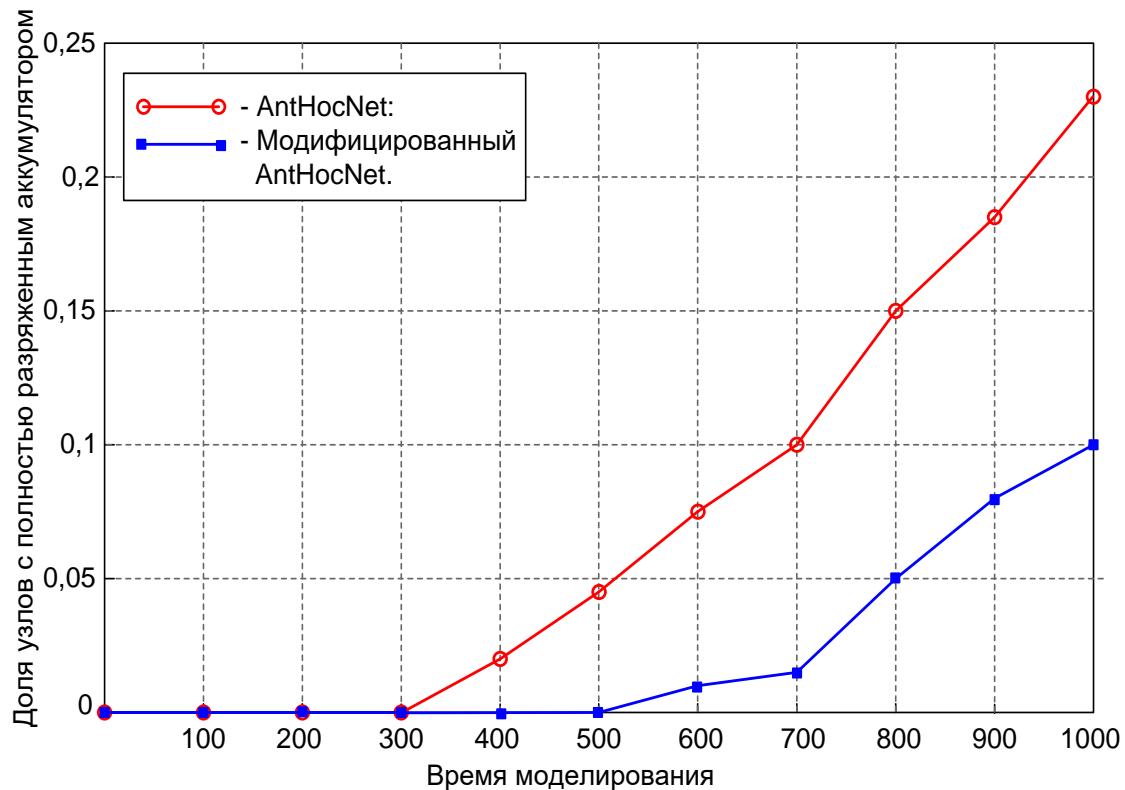


Рис. 1. Модельная зависимость доли узлов с полностью разряженным аккумулятором от времени моделирования

Из рисунка 1 видно, что с ростом времени моделирования, в сети становится больше узлов с полностью разряженным аккумулятором. Однако, соотношение узлов с полностью разряженным аккумулятором к общему количеству узлов у модифицированного алгоритма меньше, чем у AntHocNet, поскольку учитывается средняя энергия, минимальная энергия маршрута и остаточная энергия узлов, что позволяет выбирать маршрут с большей остаточной энергией, и соответственно решает проблему балансировки энергии в сети.

На рисунке 2 показаны результаты моделирования – графики зависимости времени жизни первого узла с полностью разряженным аккумулятором от скорости передачи пакетов для двух протоколов – AntHocNet и модифицированного AntHocNet.

Из рисунка 2 видно, что время жизни (отключения по причине разрядки аккумулятора) первого узла уменьшается по мере увеличения скорости отправки пакетов. Причина в том, что увеличение нагрузки означает увеличение потребления энергии, но поскольку промежуточные узлы постоянно меняются, потребление энергии относительно сбалансировано, а время отключения первого узла для модифицированного AntHocNet меньше. Кроме того, поскольку протокол учитывает уровень энергопотребления узла и оставшееся время жизни канала при выборе маршрута, он может избегать выбора узлов с высокой скоростью энергопотребления.

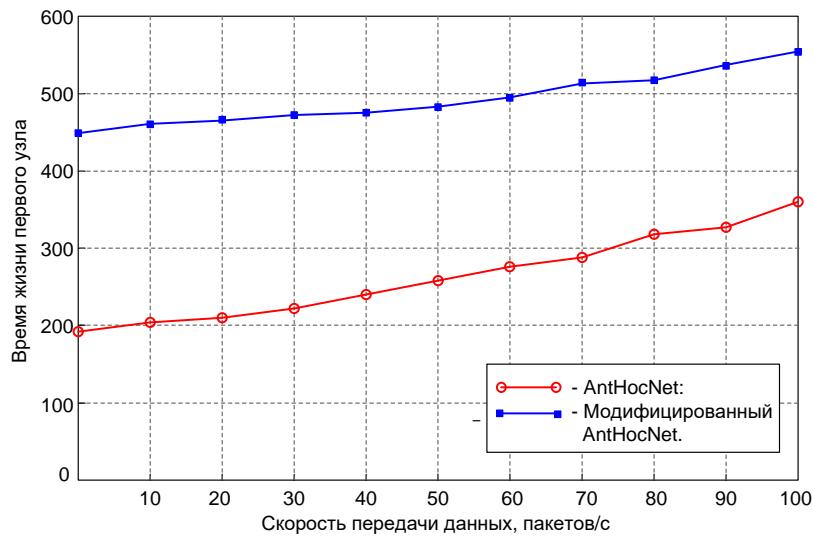


Рис. 2. Модельная зависимость времени жизни первого узла с полностью разряженным аккумулятором от скорости передачи пакетов

На рисунке 3 показаны результаты моделирования – графики зависимости доли узлов с полностью разряженным аккумулятором от скорости передачи пакетов для двух протоколов – AntHocNet и модифицированного AntHocNet.

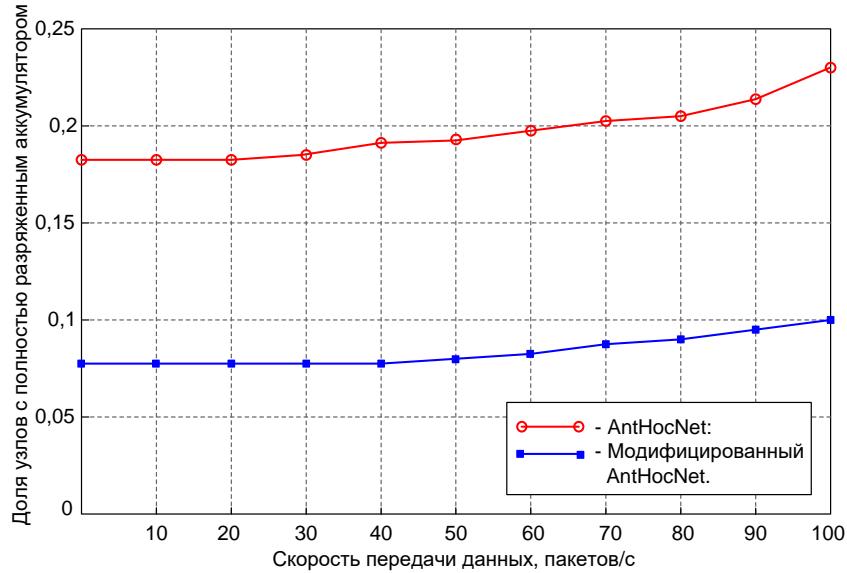


Рис. 3. Модельная зависимость доли узлов с полностью разряженным аккумулятором от скорости передачи пакетов

По мере увеличения нагрузки количество отключенных узлов постоянно увеличивается потому, что потребление энергии возрастает. В случае AntHocNet, сетевая нагрузка в основном сосредоточена на одном пути, что приводит к быстрому отказу узла. То есть, по мере увеличения сетевой нагрузки увеличивается потребление энергии узлом, что приводит к отказу канала связи. Модифицированный AntHocNet учитывает остаточную энергию узла и среднюю энергию канала при маршрутизации, поэтому узлы с большей остаточной энергией будут передавать больше пакетов. При выборе пути узлы с меньшей остаточной энергией и большой нагрузкой не будут использоваться, что может сбалансировать энергопотребление и продлить время жизни сети.

**Выводы.** Предложен модифицированный алгоритм AntHocNet, учитывающий энергопотребление элементов сети и имеющей целью сбалансированность энергопотребление узлов сети и соответственно увеличение времени жизни узлов, работающих на аккумуляторах. Предложена оценка оставшегося срока службы узлов и каналов на основе прогнозирования состояния сети, оценка остаточной энергии и среднего уровня энергии узлов по текущему состоянию сети. Модифицированный протокол маршрутизации основанный на AntHocNet использует показатели энергопотребления для вычисления значения феромона. Разработан программный комплекс для исследования предложенного модифицированного алгоритма AntHocNet. Результаты моделирования показывают, что использование модифицированного алгоритма AntHocNet делает сеть более сбалансированной по энергопотреблению, что видно по уменьшению доли узлов с полностью разраженным аккумулятором более чем в два раза при длительной работе сети и увеличению времени жизни (отключения по причине разрядки аккумулятора) первого узла.

## **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Метелёв, А. П. Протоколы маршрутизации в беспроводных самоорганизующихся сетях / А. П. Метелёв, А. В. Чистяков, А. Н. Жолобов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2013. – №3. – С. 71-78.
2. Губко, М. В. Математические модели оптимизации иерархических структур / М. В. Губко. – М.: ЛЕНАНД, 2006. – 264 с.
3. Heinzelman, W. B. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks / W. B. Heinzelman, A. P. Chandrakasan, H. Balakrishnan. // IEEE Transactions On Wireless Communications. – 2002. – Vol. 1. – No. 4. – P. 660-670.

*Поступила в редакцию 10.01.2023 г., рекомендована к печати 26.01.2023 г.*

## **ROUTING IN MANET NETWORKS BASED ON ANT COLONY ALGORITHMS TAKING INTO ACCOUNT ENERGY SAVING**

*Pavlovskaya K.A., Chervinskii V.V.*

In this work, a modified AntHocNet algorithm is proposed that takes into account the power consumption of network elements and aims to balance the power consumption of network nodes, and, accordingly, increase the lifetime of nodes on batteries.

**Keywords:** network, algorithm, routing, mobility, power consumption, traffic, ant colony.

### **Павловская Ксения Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры  
автоматики и телекоммуникаций  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический  
университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
Email: ks\_pavlovskaya@rambler.ru

### **Pavlovskaya Ksenia Aleksandrovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
of the Department of Automation and  
Telecommunications of Donetsk National Technical  
University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

### **Червинский Владимир Владимирович**

кандидат технических наук, доцент, доцент  
кафедры автоматики и телекоммуникаций  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический  
университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
Email: tscherwi@mail.ru

### **Chervinskii Vladimir Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Automation  
and Telecommunications of Donetsk National Technical  
University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

## МЕТОД ЭФФЕКТИВНОЙ ДИЭЛЕКТИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДЛЯ АНАЛИЗА МОД ШЕПЧУЩЕЙ ГАЛЕРЕИ В ДИСКОВЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ

© 2023 Добромыслов В.С.

---

Рассмотрена возможность использования метода эффективной диэлектрической проницаемости при исследовании мод шепчущей галереи в высокодобротных дисковых диэлектрических резонаторах (ДР) из одноосных кристаллов. Исследованы характеристики пластиначатых ДР из кристаллического кварца. Показано, что при изучении модового спектра результаты вычислений резонансных частот по методу эффективной проницаемости, с использованием численных методов и экспериментальные данные различаются в пределах (0,2 – 0,3) % для одиночных ДР. Погрешность вычислений характеристик пластиначатых ДР зависит от величины зазора между дисками – при малых зазорах соответствует погрешности для одиночных ДР.

**Ключевые слова:** метод эффективной диэлектрической проницаемости, дисковые диэлектрические резонаторы, моды шепчущей галереи, кристаллический кварц, двухслойные диэлектрические волноводы, погрешности измерений.

---

**Введение.** Дисковые диэлектрические резонаторы (ДР) с модами шепчущей галереи нашли применение в генераторах сверхвысоких частот для стабилизации частоты, в частотных дискриминаторах, при измерениях параметров диэлектрических материалов [1].

Характерными особенностями таких резонаторов являются: преимущественная концентрация электромагнитного поля в области цилиндрической поверхности диска, высокая радиационная добротность.

Известны различные методы анализа модового спектра дисковых ДР. Это приближенные методы частичных областей [2], численные методы [3, 4].

Метод эффективной диэлектрической проницаемости (ЭДП) был предложен в работе [5] при исследовании устройств интегральной оптики. Метод позволяет получать достаточно точные результаты при изучении характеристик прямоугольных диэлектрических волноводов (ДВ) миллиметрового диапазона волн. Также нашел применение для анализа мод шепчущей галереи в дисковых ДР [1]. Особенно удобен метод эффективной проницаемости при разработке компьютерных программ для экспресс-анализа основных характеристик дисковых ДР [6].

Вводимые данные: класс колебаний –  $HE$ ,  $EH$ ; индексы колебаний –  $n$  (азимутальный индекс),  $m$  (радиальный индекс),  $l$  (аксиальный индекс); размеры диска (диаметр, высота), диэлектрическая проницаемость материала резонатора (для одноосных кристаллических материалов –  $\epsilon_{//}$ ,  $\epsilon_{\perp}$ ), тангенс угла диэлектрических потерь материала резонатора, диэлектрическая проницаемость окружающей среды.

Результаты вычислений: резонансная частота, тепловая и радиационная добротность, концентрация электромагнитной энергии в материале резонатора.

Ниже приводится интерфейс вычислительной программы для расчета характеристик открытых дисковых ДР (рис. 1).

Целью данной работы является апробация метода эффективной диэлектрической проницаемости для анализа дисковых ДР с более сложной геометрией – пластиначатых ДР (рис. 2).

<p>Проектирование диэлектрических резонаторов с азимутальными колебаниями</p> <p>Выберите класс колебаний нажатием соответствующей клавиши:</p> <p>HE или E - F1 EH или H - F2</p>
<p>Введите индексы колебания: n,m,l <b>21</b> <b>1</b> <b>1</b></p>
<p>Введите диаметр резонатора в сантиметрах: 3.5</p>
<p>Введите высоту резонатора в сантиметрах: 0.7</p>
<p>Введите диэлектрическую проницаемость <math>\epsilon_{\perp}</math>: 4.429 Введите диэлектрическую проницаемость <math>\epsilon_{  }</math>: 4.637</p> <p>Колебание - HE<sub>21, 1, 1</sub> Диаметр резонатора = 3.500 см Высота резонатора = .700 см Диэлектрическая проницаемость: в направлении, нормальном оси резонатора = 4.429 в направлении, параллельном оси резонатора = 4.637 окружающей среды = 1.0006 Time = 0.000 сек Резонансная частота <math>f_p = 33373</math> МГц Радиационная добротность <math>Q_{изл} = 1.08 \cdot 10^7</math> <math>lg(Q_{изл}) = 7.03</math> Коэффициент добротности <math>K_Q = 0.97</math> Парциальная добротность <math>Q_{тепл} = 1/(K_Q \cdot tg\delta) = 51327</math> Полная добротность резонатора <math>Q = 51084</math> Выберите одно из следующих действий нажатием соответствующей клавиши: Расчет резонансной частоты - F1 Расчет добротностей - F2 Ввод новых исходных данных - F3 Окончание работы программы - F10</p>

Рис. 1. Интерфейс вычислительной программы для расчета характеристик открытых дисковых ДР

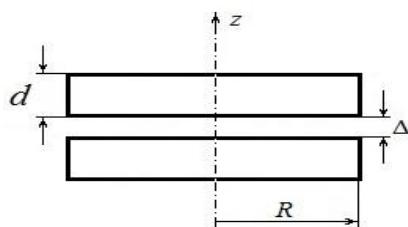


Рис. 2. Пластиначатый диэлектрический резонатор

Пластиначатые дисковые ДР при возбуждении мод шепчущей галереи  $HE_{n,m,l}$  типа (преимущественная ориентация электрического поля  $E_z$  вдоль оси дисков) могут иметь более высокие добротности по сравнению с одиночными дисковыми ДР. Указанная особенность обусловлена повышенной концентрацией электромагнитной энергии в

зазоре между дисками. Для резонаторов из кристаллического кварца и лейкосапфира превышение добротности может составлять порядка 20 % [7].

**Электродинамический анализ дисковых диэлектрических резонаторов.** В методе ЭДП при анализе одиночных дисковых ДР рассматриваются две вспомогательные задачи: о колебаниях диэлектрического цилиндра и радиальных волнах в диэлектрической пластине с толщиной, равной высоте диска (рис. 3).

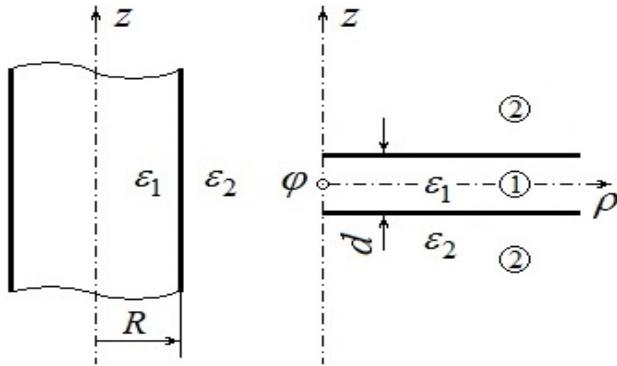


Рис. 3. Цилиндрический ДР и плоский радиальный диэлектрический волновод

Высокодобротные колебания как правило наблюдаются в дисковых ДР из одноосных монокристаллических материалов с осью анизотропии, ориентированной вдоль геометрической оси резонатора. Для таких материалов диагональный тензор диэлектрической проницаемости имеет вид:

$$\hat{\varepsilon}_1(z) = \begin{vmatrix} \varepsilon_{1\perp}(z) & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{1\perp}(z) & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{1\parallel}(z) \end{vmatrix}.$$

Из граничных условий на цилиндрической стенке двумерного цилиндрического ДР несложно получить следующее характеристическое уравнение для комплексного спектра колебаний [8]. Для случая  $\mu_1 = \mu_2 = 1$  оно записывается как:

$$\frac{\sqrt{\varepsilon}}{\chi} \frac{J_n(\chi_1 R)}{j_n(\chi_1 R)} = \frac{H_n^{(2)}(\chi_2 R)}{\dot{H}_n^{(2)}(\chi_2 R)}, \quad (1)$$

$$\text{где } \chi = \begin{cases} \varepsilon = \varepsilon_1 / \varepsilon_2 & \text{для } E \text{ колебаний } (E_z \neq 0) \\ 1 & \text{для } H \text{ колебаний } (H_z \neq 0), \end{cases} \quad \chi_1 = 2\pi f_p \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \cdot \sqrt{\varepsilon_1}, \quad \chi_2 = 2\pi f_p \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \cdot \sqrt{\varepsilon_2},$$

$H_n^{(2)}(\chi_2 R) = J_n(\chi_2 R) - jY_n(\chi_2 R)$  – функция Ханкеля второго рода, а точкой у функций обозначена производная по всему аргументу.

В случае одноосных кристаллических материалов с кристаллографической осью ориентированной вдоль оси цилиндра в уравнении (1) относительная диэлектрическая проницаемость:

$$\varepsilon_1 = \begin{cases} \varepsilon_{1\parallel} & \text{для } E \text{ колебаний} \\ \varepsilon_{1\perp} & \text{для } H \text{ колебаний} \end{cases}.$$

Уравнение (1) запишем в виде:

$$1 + j\xi = 0, \quad (2)$$

где  $\xi$  - обобщенная расстройка:

$$\xi = -\frac{\sqrt{\varepsilon} J_n(\chi_1 R) \dot{Y}_n(\chi_2 R) - \chi J_n(\chi_1 R) Y_n(\chi_2 R)}{\sqrt{\varepsilon} J_n(\chi_1 R) \dot{J}_n(\chi_2 R) - \chi J_n(\chi_1 R) J_n(\chi_2 R)}$$

На резонансной частоте обобщенная расстройка  $\xi = 0$ , соответственно, из последнего выражения следует:

$$\frac{\sqrt{\varepsilon}}{\chi} \frac{J_n(\chi_1 R)}{\dot{J}_n(\chi_1 R)} = \frac{Y_n(\chi_2 R)}{\dot{Y}_n(\chi_2 R)}. \quad (3)$$

Последнее уравнение определяет резонансную частоту  $f_p$  цилиндрического ДР.

Радиационную добротность колебаний можно найти из (2) по крутизне фазочастотной характеристики:

$$Q_{uzl} = \frac{1}{2} f_p \left. \frac{d\xi}{df} \right|_{f=f_p}. \quad (4)$$

Распределение поля мод в плоском радиальном диэлектрическом волноводе имеет вид ( $\mu_1 = \mu_2 = 1$ ):

для  $E$ -волн:

$$H_\varphi(z) = A \begin{cases} \cos h_1 z \\ \sin h_1 z \end{cases}, \quad 0 \leq |z| \leq d/2,$$

$$H_\varphi(z) = B e^{-h_2 \left( \frac{d}{2} - |z| \right)}, \quad |z| \geq d/2,$$

$$\text{где } h_1 = k_0 \sqrt{\varepsilon_{1\perp} - \frac{\varepsilon_{1\perp}}{\varepsilon_{1\parallel}} U^2}, \quad h_2 = k_0 \sqrt{U^2 - \varepsilon_2};$$

для  $H$ -волн:

$$E_\varphi(z) = C \begin{cases} \cos h_1 z \\ \sin h_1 z \end{cases}, \quad 0 \leq |z| \leq d/2,$$

$$E_\varphi(z) = D e^{h_2 \left( \frac{d}{2} - |z| \right)}, \quad |z| \geq d/2,$$

где  $h_1 = k_0 \sqrt{\varepsilon_{1\perp} - U^2}$ ,  $h_2 = k_0 \sqrt{U^2 - \varepsilon_2}$ ,  $k_0 = 2\pi / \lambda$ ,  $U = \lambda / \lambda_b$  (коэффициент замедления поверхностных волн).

Из граничных условий для компонент полей на границе раздела сред 1 и 2 (рис. 3), можно получить характеристические уравнения для определения коэффициента замедления  $U$  ДВ с одноосной анизотропией диэлектрической проницаемости. Они имеют вид [1]:

для  $E$ -волн:

$$\operatorname{Arctg} \left[ \frac{\varepsilon_{1\perp}}{\varepsilon_2} \sqrt{\frac{\varepsilon_{1\parallel}(U^2 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_{1\perp}(\varepsilon_{1\parallel} - U^2)}} \right] + (l-1) \frac{\pi}{2} = \pi d' \sqrt{\frac{\varepsilon_{1\perp}}{\varepsilon_{1\parallel}} (\varepsilon_{1\parallel} - U^2)};$$

для  $H$ -волн:

$$\operatorname{Arctg} \left[ \sqrt{\frac{(U^2 - \varepsilon_2)}{(\varepsilon_{1\perp} - U^2)}} \right] + (l-1) \frac{\pi}{2} = \pi d' \sqrt{(\varepsilon_{1\perp} - U^2)},$$

где  $d' = \frac{d}{\lambda}$  - относительная толщина диэлектрического волновода (высота резонатора),

$l = 1, 2 \dots$  – количество вариаций поля по толщине диэлектрического волновода.

Резонансная частота дискового ДР вычисляется по уравнению (3), при этом в качестве диэлектрической проницаемости материала принимается величина  $\varepsilon_{1\text{эфф}}$ , определяемая через квадрат коэффициента замедления радиальной поверхностной волны ДВ:  $\varepsilon_{1\text{эфф}} = U^2$ .

Радиационная добротность ДР рассчитывается по уравнению (4), в котором новое значение радиального волнового числа  $\chi_1$  определяется как:

$$\chi_1 = 2\pi f_p \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \cdot \sqrt{\varepsilon_{1\text{эфф}}}.$$

**Электродинамический анализ пластинчатых дисковых диэлектрических резонаторов.** В методе ЭДП при анализе пластинчатых ДР также рассматриваются две вспомогательные задачи: о колебаниях диэлектрического цилиндра и цилиндрических волнах в двухслойном диэлектрическом волноводе. Эффект повышения добротности пластинчатых ДР наиболее выражен для колебаний  $HE_{n,1,1}$  с четным распределением компоненты электрического поля  $E_z$  относительно плоскости симметрии резонатора. Поэтому ниже соответственно ограничимся рассмотрением четных волн двухслойного ДВ  $E$ -типа, рис. 4.

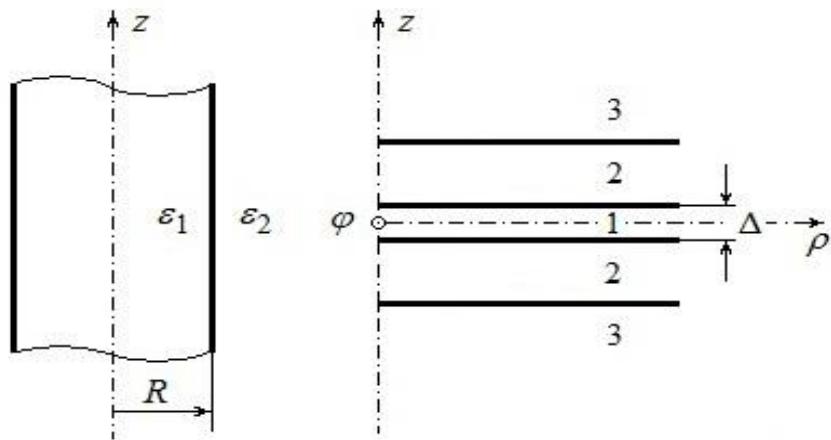


Рис. 4. Цилиндрический ДР и плоский двухслойный радиальный ДВ

Распределение поля  $E$ -волн четного порядка в плоском двухслойном радиальном диэлектрическом волноводе  $\sqrt{\varepsilon_{2\parallel}} \geq U \geq \sqrt{\varepsilon_1}$  имеет вид:

область 1:

$$H_\varphi(z) = A \operatorname{ch} h_1 z,$$

области 2:

$$H_\varphi(z) = B \cos(h_2 z + \psi),$$

области 3:

$$H_\varphi(z) = D e^{-h_3 \left( d + \frac{\Delta}{2} - |z| \right)},$$

где  $h_1 = k_0 \sqrt{U^2 - \varepsilon_1}$ ,  $h_2 = k_0 \sqrt{\varepsilon_{2\perp} - \frac{\varepsilon_{2\perp}}{\varepsilon_{2\parallel}} U^2}$ ,  $h_3 = k_0 \sqrt{U^2 - \varepsilon_3}$ .

Границные условия для компонент полей  $E$  – волн приводят к соотношениям

$$\begin{aligned} [h_1 \cdot t \cdot h \cdot h_1 \cdot \Delta / 2] / \eta_{12} + h_2 \cdot \operatorname{tg}(h_2 \Delta / 2 + \psi) &= 0, \\ \{h_2 \cdot \operatorname{tg}[h_2(d + \Delta / 2) + \psi]\} / \eta_{23} &= h_3. \end{aligned},$$

где  $\eta_{12} = \varepsilon_1 / \varepsilon_{2\perp}$ ,  $\eta_{23} = \varepsilon_{2\perp} / \varepsilon_3$ .

Путем исключения в них величины  $\psi$  получим характеристическое уравнение для  $E$  – волн двухслойного ДВ

$$h_1 \Delta / 2 + \operatorname{arctg} \cdot \{ \eta_{12} (h_2 / h_1) \operatorname{tg} [\operatorname{arctg}(\eta_{23} h_3 / h_2) - h_2 d] \} = (l - 1)\pi, \quad (5)$$

где  $l = 1, 2, \dots$ .

Уравнение (5) определяет коэффициент замедления  $U$  поверхностных  $E$  – волн четного порядка двухслойного ДВ с одноосной анизотропией диэлектрической проницаемости. Резонансная частота ДР на основе двух соосно расположенных диэлектрических дисков определяется уравнением (3), в котором в качестве диэлектрической проницаемости материала также используется величина  $\varepsilon_{\text{эфф}}$ , определяемая через квадрат коэффициента замедления радиальной поверхностной волны двухслойного ДВ. Радиационная добротность пластинчатого ДР находится по выражению (4) с учетом нового значения радиального волнового числа  $\chi_1$ .

**Исследование характеристик пластинчатых дисковых диэлектрических резонаторов.** Численное исследование характеристик ДР на основе двух соосно расположенных диэлектрических дисков проводилось как по методу ЭДП так и более точному методу на основе интегродифференциальных уравнений [4]. Рассматривались резонаторы из кристаллического кварца с диаметром  $2R=35,0$  мм и толщиной дисков  $d=2,5; 3,0; 3,5$  мм. Геометрическая ось резонатора ориентирована вдоль кристаллографической оси кварца. Выбор был остановлен на колебании  $HE_{21,1,1}$  с достаточно высоким уровнем радиационной добротности –  $Q_{\text{изл}} \approx 10^5 \dots 10^7$ . Величина добротности кварцевых резонаторов, обусловленная диэлектрическими потерями, в режиме  $HE$  колебаний в миллиметровом диапазоне близка к  $(4 \dots 5) \cdot 10^4$ . В расчетах использовались следующие диэлектрические параметры:  $\varepsilon_{\parallel} = 4,637$ ;  $\varepsilon_{\perp} = 4,429$  [9].

На рис. 5 представлены графики зависимостей  $f_p(\Delta)$  для колебания  $HE_{21,1,1}$ . Для оценки точности вычислений методом ЭДП на графиках также приведены зависимости  $f_p(\Delta)$ , полученные численным методом с учетом разложения поля резонатора по гармоническим составляющим [4]. В цитируемой работе поля резонатора выражены в

виде бесконечных сумм цилиндрических  $E$  и  $H$ -волн многослойной диэлектрической структуры. Поиск резонансных частот сведен к исследованию корней системы алгебраических уравнений.

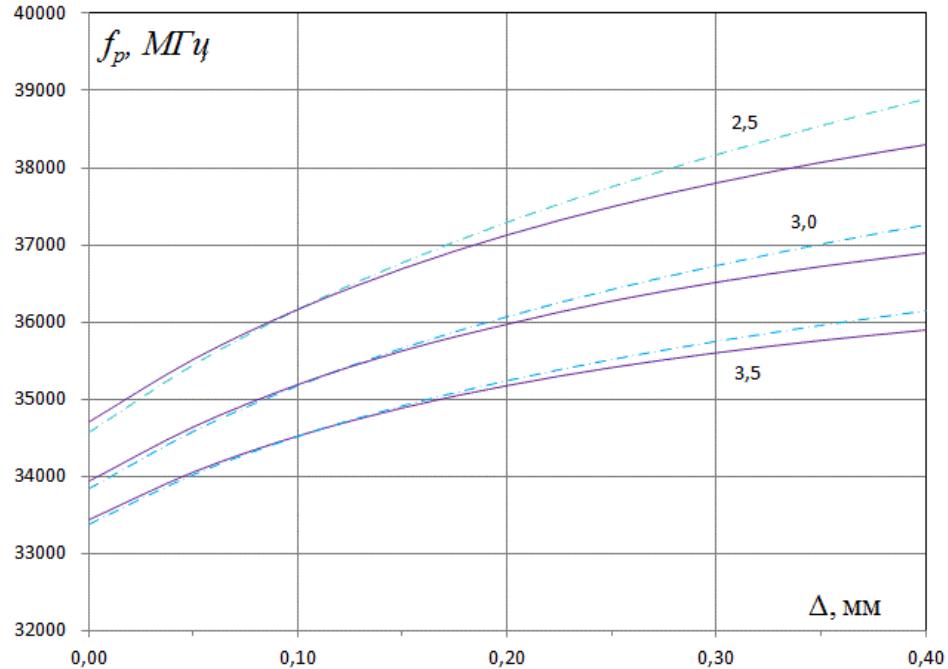


Рис. 5. Графики зависимостей  $f_p(\Delta)$  для  $HE_{21,1,1}$  колебания пластинчатого кварцевого резонатора от ширины зазора  $\Delta$

На рис. 5 сплошные линии – по алгоритму [4], штрихпунктирные линии – по методу ЭДП; толщина дисков –  $d=2,5\text{мм}$ ;  $3,0\text{ мм}$ ;  $3,5\text{ мм}$ . При нулевом зазоре между дисками различие резонансных частот рассчитанных по методу ЭДП и численному методу составляет:  $0,20\%$  ( $d = 3,5\text{ мм}$ );  $0,28\%$  ( $d = 3,0\text{ мм}$ );  $0,39\%$  ( $d = 2,5\text{ мм}$ ). При этом резонансные частоты по методу ЭДП имеют более низкие величины. В диапазоне  $\Delta \approx (0,1 \dots 0,2)$  мм наблюдается пересечение частотных зависимостей.

С увеличением зазора  $\Delta$  расчет резонансных частот по методу ЭДП дает завышенные оценки относительно численного метода. При  $\Delta = 0,4$  мм превышение составляет:  $0,67\%$  ( $d = 3,5\text{ мм}$ );  $1,02\%$  ( $d = 3,0\text{ мм}$ );  $1,56\%$  ( $d = 2,5\text{ мм}$ ).

Зависимости концентрации электромагнитной энергии в зазоре между дисками от его величины показаны на рис. 6. Расчеты выполнены с использованием соотношения [8]:

$$K_{Q\Delta}(\Delta) = \frac{W_{зан\epsilon\Delta}}{W_{зан}} = \frac{-2\delta f_p}{\delta_{\epsilon\Delta}},$$

где  $W_{зан\epsilon\Delta}$  – энергия, запасенная непосредственно в зазоре между дисками, (рис. 2);  $W_{зан}$  – энергия, запасенная резонатором;  $\delta f_p = \frac{\Delta f_p}{f_p}$  – относительное изменение резонансной частоты;  $\delta_{\epsilon\Delta} = \frac{\Delta\epsilon_\Delta}{\epsilon_\Delta}$  – относительное приращение диэлектрической проницаемости среды между дисками ( $\epsilon_\Delta = 1,0006$ ).

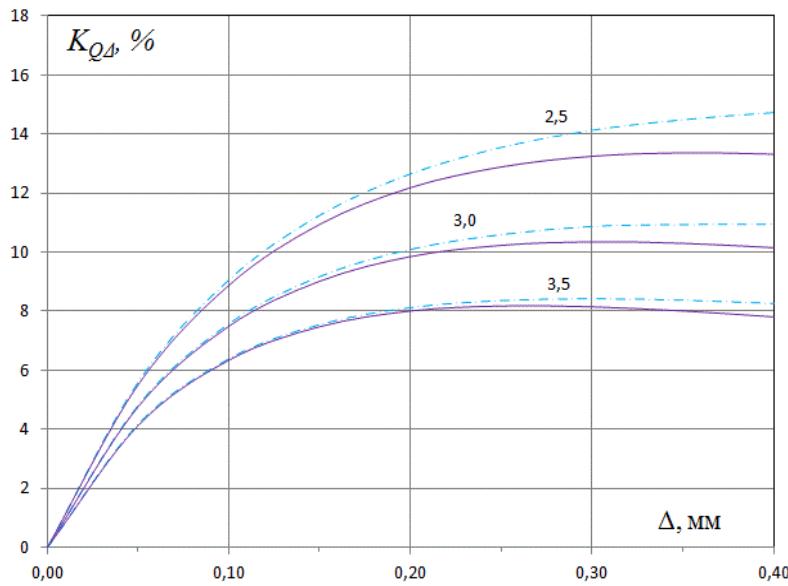


Рис. 6. Графики зависимостей  $K_{Q\Delta}$  для  $HE_{21,1,1}$  колебания пластинчатого кварцевого резонатора от ширины зазора  $\Delta$

На рис. 6 сплошные линии – по алгоритму [4], штрихпунктирные линии – по методу ЭДП; толщина дисков –  $d=2,5\text{мм}$ ;  $3,0\text{ мм}$ ;  $3,5\text{ мм}$ . Видно, что величины концентрации электромагнитной энергии в зазоре, полученные по методу ЭДП, имеют несколько завышенную оценку. В диапазоне  $\Delta = (0,0 \dots 0,4)$  мм отличие составляет:  $(0,00 \dots 0,45)\%$  для  $d = 3,5\text{ мм}$ ;  $(0,00 \dots 0,82)\%$  для  $d = 3,0\text{ мм}$ ;  $(0,00 \dots 1,44)\%$  для  $d = 2,5\text{ мм}$ . В случае более тонких дисков,  $d = 2,5\text{ мм}$ , отмечается более высокая концентрация электромагнитной энергии в зазоре,  $K_{Q\Delta}(\Delta) \approx 14\%$  ( $\Delta \approx 0,4\text{мм}$ ), что приблизительно соответствует увеличению добротности резонатора на те же 14 % (потери воздуха достаточно малы относительно потерь в кристаллическом кварце). Зависимости радиационной добротности  $\lg Q_{изл}(\Delta)$  пластинчатого кварцевого резонатора показаны на рис. 7.

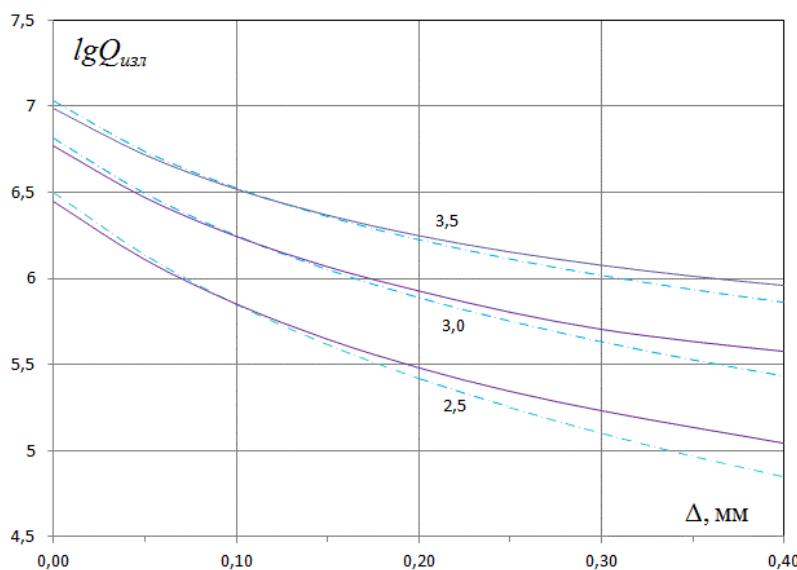


Рис. 7. Графики зависимостей  $\lg Q_{изл}$  для  $HE_{21,1,1}$  колебания пластинчатого кварцевого резонатора от ширины зазора  $\Delta$

На рис. 7 сплошные линии – по алгоритму [4, 10], штрихпунктирные линии – по методу ЭДП; толщина дисков –  $d = 2,5\text{мм}$ ;  $3,0 \text{ мм}$ ;  $3,5 \text{ мм}$ . При  $\Delta = 0,0 \text{ мм}$  величины  $\lg Q_{изл}(\Delta)$ , рассчитанные методу ЭДП, имеют незначительно завышенные относительно численного метода [4, 10] оценки. С увеличением зазора  $\Delta$  характер зависимостей меняется на противоположный: величины  $\lg Q_{изл}$ , полученные по методу ЭДП, становятся меньше значений, соответствующих численному методу.

**Экспериментальные исследования.** Измерения частот мод шепчущей галереи в ДР были проведены в миллиметровом и сантиметровом диапазонах длин волн с использованием векторного анализатора спектра ROHDE&SCHWARZ. Ниже показана схема включения ДР в СВЧ цепь (рис. 8). Возбуждение ДР проводилось через участок распределенной связи с микрополосковой линией.

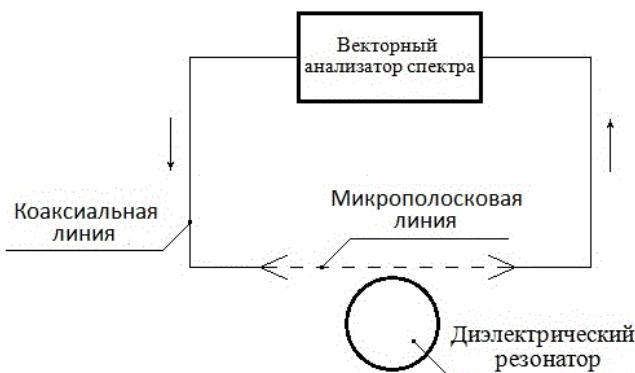


Рис. 8. Схема экспериментальной установки

Пример осциллограммы для дискового ДР из лейкосапфира приведен на рис. 9. Геометрическая ось резонатора ориентирована вдоль кристаллографической оси лейкосапфира. Размеры резонатора: диаметр –  $35,99 \text{ мм}$ ; высота –  $13,95 \text{ мм}$ . Диэлектрические параметры лейкосапфира:  $\epsilon_{||} = 11,577$ ;  $\epsilon_{\perp} = 9,388$  [11].

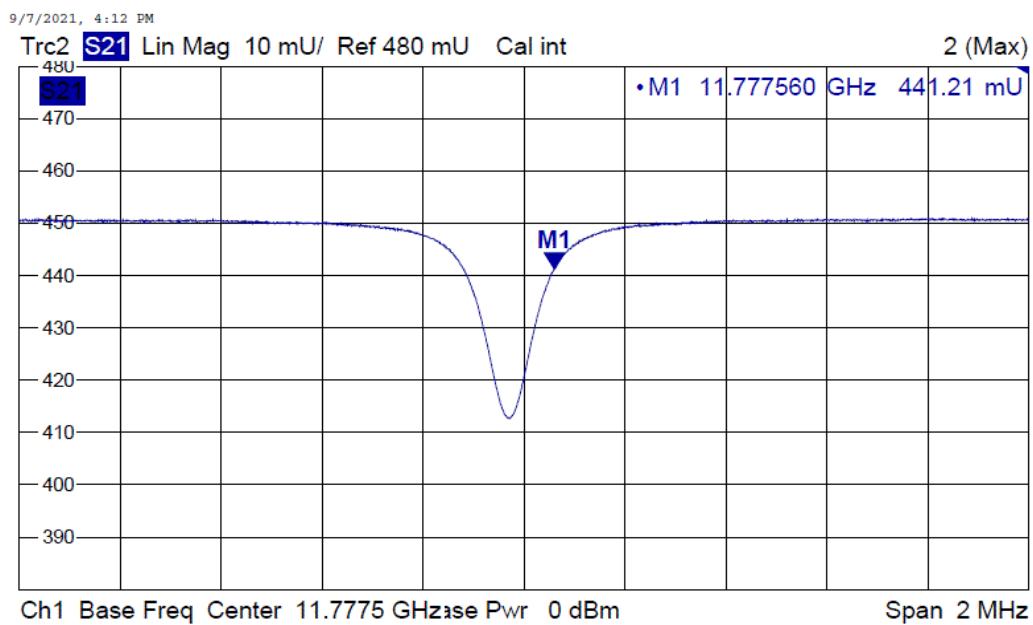


Рис. 9. Частотная зависимость коэффициента передачи  $S_{21}$  для дискового ДР из лейкосапфира

Результаты сравнения резонансной частоты ДР на колебании  $HE_{11,1,1}$  частотами, рассчитанными по описанному в [4] численному алгоритму и по методу ЭДП сведены в табл. 1.

Таблица 1. Значение измеренной резонансной частоты, а также рассчитанной по приведенному в [4] алгоритму и по модели ЭДП

Тип колебаний	Эксперимент	Алгоритм [4]	Метод ЭДП
$HE_{11,1,1}$	11777 МГц	11771 МГц	11736 МГц

Оценка нагруженной добротности лейкосапфирового резонатора по уровню 0,707 дает величину  $Q_n = \frac{f_p}{2\Delta f} \approx 1,57 \cdot 10^5$  (см рис. 9).

Коэффициент связи ДР с внешней линией определяется как:

$$\beta = (1 - S_{21r}/S_{21n}) / (1 + S_{21r}/S_{21n}),$$

где  $S_{21r}$  – коэффициент передачи полосковой линии на резонансной частоте,  $S_{21n}$  – коэффициент передачи линии при удаленном расположении ДР.

Оценка коэффициента связи лейкосапфирового резонатора с внешней линией дает значение  $\beta = 4,41\%$  (см. рис. 9). Собственная добротность ДР с учетом потерь на излучение составляет  $Q_0 = Q_n(1+\beta) \approx 1,64 \cdot 10^5$ . Расчет радиационной добротности дает величину  $Q_{изл} \approx 1,36 \cdot 10^7$ . Пластиначатый ДР был выполнен на основе двух дисков из кристаллического кварца с ориентацией геометрической оси резонатора вдоль кристаллографической оси. Усредненная толщина дисков по результатам ряда измерений при различных угловых положениях дисков составила  $\approx 3,45$  мм, усредненный радиус:  $\approx 17,40$  мм. Измерения резонансных частот были проведены на типе колебаний  $HE_{21,1,1}$  при различных расстояниях между дисками  $\Delta$ . Величина зазора  $\Delta$  регулировалась с использованием полиимидных дисковых пленок фиксированной толщины (0,10 мм) с диаметром 14 мм. Сборка конструкции резонатора проводилась с помощью шайб и прижимных гаек на центральном металлическом стержне с диаметром 3 мм. Пример осциллограммы для случая  $\Delta=0,0$  мм приведен на рис. 10 в виде частотной зависимости прошедшего на векторный анализатор спектра сигнала.

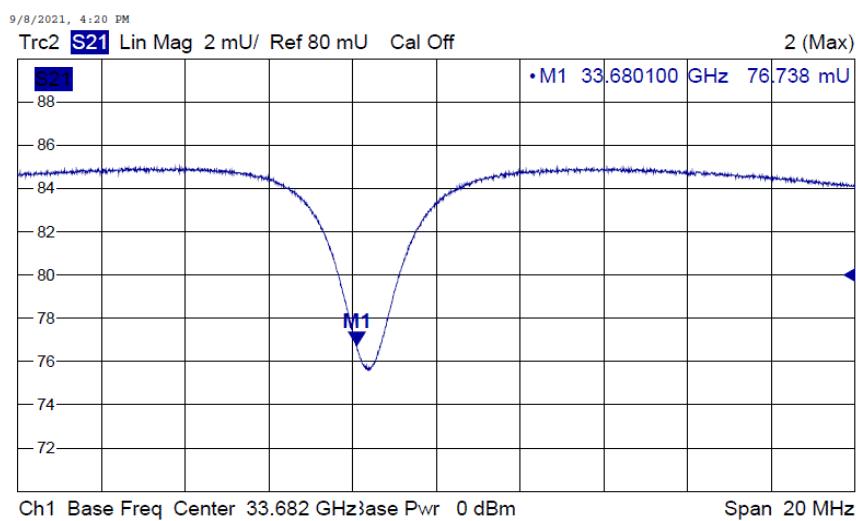


Рис. 10. Частотная зависимость коэффициента передачи  $S_{21}$  для пластиначатого ДР из кристаллического кварца

Оценка нагруженной добротности резонатора по уровню 0,707:  $Q_{\text{н}} = \frac{f_p}{2\Delta f} \approx 3,4 \cdot 10^4$ ,

см рис. 10. Коэффициент связи резонатора с внешней линией составляет  $\beta = 5,89\%$ . Собственная добротность резонатора:  $Q_0 = Q_{\text{н}} (1 + \beta) \approx 3,6 \cdot 10^4$ . Радиационная добротность  $Q_{\text{изл}} \approx 0,98 \cdot 10^7$ .

Зависимость резонансной частоты от величины зазора  $\Delta$  приведена на рис. 11. Наблюдаемые небольшие отклонения экспериментальных точек, вероятно обусловлены различием степени сжатия прижимных гаек.

Видно, что при малых зазорах ( $\Delta = 0,0 \dots 0,3$  мм) результаты по методу ЭДП имеют приемлемую погрешность  $\delta f_p \approx 0,4\%$ . С увеличением зазора погрешность расчета резонансных частот по методу ЭДП возрастает.

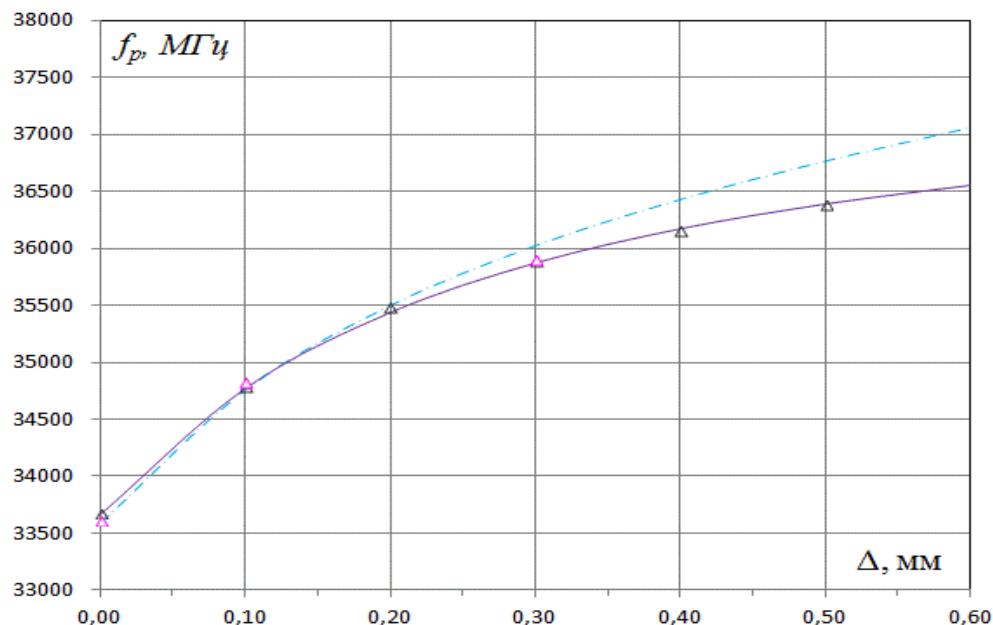


Рис. 11. График зависимости  $f_p(\Delta)$  пластинчатого резонатора из кристаллического кварца

На рис. 11 сплошная линия – численный метод [4], штрихпунктирная линия – метод ЭДП;  $\Delta$  – экспериментальные точки.

**Выводы.** Использование метода эффективной диэлектрической проницаемости для расчета характеристик одиночных дисковых ДР с модами шепчущей галереи позволяет получать достаточно точные результаты: погрешность – (0,2 … 0,3) %. При исследовании пластинчатых ДР метод ЭДП показал свою применимость для случая малых зазоров между диэлектрическими дисками. Особенно метод ЭДП эффективен при разработке компьютерных программ для экспресс-анализа основных характеристик одиночных ДР и пластинчатых дисковых ДР с малыми зазорами между дисками: резонансных частот, концентрации электромагнитной энергии в диэлектрике и зазоре между дисками, радиационной добротности. Оценки точности метода ЭДП подтверждены путем сравнения характеристик ДР, полученных с использованием численных методов и результатами экспериментальных исследований.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Диэлектрические резонаторы / М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятышев, Л. Г. Гассанов [и др.]; под ред. М. Е. Ильченко. Москва : Радио и связь, 1989. – 326 с.

2. Schlosser, W. Eineinfachenaherung fur dasphasenmar der crundwellenanrechteckigendielektrischendrahten. – Arch. Elekt. Ubertr. – 1965. – bd.19. – No. 3. – S. 166 – 178.
3. Веселов, Г. И. Применение метода частичных областей к задаче о собственных колебаниях диэлектрического резонатора / Г. И. Веселов, А. В. Гуреев // Электронная техника. Сер. Микроэлектронные устройства. – 1982. – Вып. 2(32). – № 11. – С. 11 – 18.
4. Добромыслов, В. С. Расчет спектра собственных колебаний экранированных диэлектрических резонаторов / В. С. Добромыслов, В. И. Калиничев, А. В. Крюков // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 1990. – Т. 33. – № 9. – С. 1068 – 1077.
5. Knox, R. M. Integrated circuits for millimeter through optical frequency range / R. M. Knox, P. P. Toulios // In Proc. Symposium on submillimeter waves (New York, March 31-April 2 1970). – Polytechnic Institute of Brooklyn, 1970. – P. 497–516.
6. Добромыслов, В. С. Вычислительная программа для расчета характеристик открытых дисковых диэлектрических резонаторов / В. С. Добромыслов, Д. Б. Громов // Препринт № 01–14. – Москва: МЭИ. 1991. – 12 с.
7. Добромыслов, В. С. Исследование пластинчатых диэлектрических резонаторов / В. С. Добромыслов, А. А. Курушин // Радиотехника. – 2022. – Т. 86, № 4. – С. 132-148. – DOI 10.18127/j00338486-202204-16. – EDN IQQHOW.
8. Добромыслов, В. С. Резонансные СВЧ-устройства / В. С. Добромыслов. М.: МЭИ, 1995. – 122с.
9. Егоров, В. Н. Кварц монокристаллический. Диэлектрическая проницаемость в диапазоне температур 77 – 373 К / В. Н. Егоров, В. Л. Масалов, М. В. Кащенко, Е. Н. Токарева // Таблицы ГССД № 277 – 2011. М.: ФГУП «Стандартинформ». Деп. 02.06.2011.
10. Добромыслов, В. С. Радиационная добротность дисковых диэлектрических резонаторов / В. С. Добромыслов, А. В. Крюков // Радиотехника и электроника. – 1991. – Т. 36. – №10. – С. 2040 –2045.
11. Егоров, В. Н. Измерение тензора диэлектрической проницаемости сапфира при температуре от 93 до 343 К / В. Н. Егоров, А. С. Воловиков // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2001. – Т. 44. – № 11. – С. 960-966.

*Поступила в редакцию 18.01.2023 г., рекомендована к печати 06.02.2023 г.*

## **EFFECTIVE PERMITTIVITY METHOD FOR THE WHISPERING GALLARY MODES ANALYSIS IN DISK DIELECTRIC RESONATORS**

**Dobromyslov V.S.**

The possibility of using the method of effective permittivity in the study of whispering gallery modes in high Q-factor disk dielectric resonators (DR) made of uniaxial crystals is considered. The characteristics of plate DR made of crystalline quartz are investigated. It is shown that when studying the mode spectrum, the results of calculations of resonant frequencies by the method of effective permittivity and experimental data differ within (0,2 – 0,3) % for single DR. The calculation error of the characteristics of plate DR depends on the gap size between the disks – with small gaps it corresponds to the error for single DR.

**Keywords:** Method of effective permittivity, disk dielectric resonators, whispering gallery modes, crystalline quartz, two-layer dielectric waveguides, measurement errors.

**Добромыслов Владимир Сергеевич**  
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры формирования и обработки радиосигналов ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"»,  
Российская Федерация, г. Москва.  
E-mail: mpei-dvs@mail.ru

**Dobromyslov Vladimir Sergeevich**  
Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,  
Associate Professor at Department of Formation and Processing of Radio Signals of Moscow Power Engineering Institute,  
Russian Federation, Moscow.

## МОДУЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА СЕТЕВОГО ТРАФИКА В СИСТЕМАХ ОБНАРУЖЕНИЯ ВТОРЖЕНИЙ НА БАЗЕ СОВОКУПНОСТИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

© 2023 Стрижко М.А., Червинский В.В., Турупалов В.В.

---

В работе проведено исследование нейросетевых моделей для анализа сетевого трафика в системах IDS. В качестве исходных данных для обучения и тестирования искусственных нейронных сетей выбрана открытая база данных атак. Приняты критерии оценки различных механизмов распознавания нормальных и аномальных ситуаций: точность обнаружения и частота ложных срабатываний. Предложена модификация программного модуля интеллектуального анализа сетевого трафика на основе трех различных нейронных сетей, которая позволяет улучшить принятые критерии оценки и адаптировать поведение системы IDS под требования вышестоящей системы.

**Ключевые слова:** нейронная сеть, сетевой трафик, анализ данных, ложное срабатывание, атака, вторжение, точность обнаружения.

---

**Введение.** Современные инфокоммуникационные сети, как корпоративные, так и общего пользования, ставят высокие требования к информационной безопасности, обеспечение которой осуществляют антивирусные средства, межсетевые экраны, системы контроля целостности, системы обнаружения вторжений (IDS), криптографические средства защиты и другие системы. В настоящее время одним из наиболее эффективных инструментов обнаружения сетевых атак и других вредоносных воздействий в режиме реального времени выступают системы обнаружения вторжений (СОВ – IDS – Intrusion Detection System), а для предотвращения вторжений – системы IPS (Intrusion Prevention System) [1]. Их работа заключается в сборе, анализе и обработке информации об аномальных событиях и ситуациях, влияющих на безопасность защищаемой инфокоммуникационной сети, а также мониторинг сетевой активности сетевых сервисов и служб, накопление данных, принятие решений об уведомлении вышестоящих систем и администраторов о нештатных ситуациях в защищаемой системе, выявление и, по возможности, противодействие несанкционированному воздействию на сетевые ресурсы [2].

**Постановка проблемы.** Сейчас в мире разработано и применяется огромное количество разнообразных систем IDS, реализованных как в виде отдельных программно-аппаратных комплексов, так и в виде программного обеспечения. Для обнаружения сетевых атак и других аномалий они используют различные методы и подходы. Однако, ни одна из таких систем не гарантирует абсолютной информационной безопасности защищаемой сети. Поэтому поиск, разработка и реализация наиболее эффективных подходов и методов для обнаружения вторжений выступает одной из самых востребованных задач в сфере безопасности инфокоммуникаций. Главное требование, предъявляемое к таким системам, – это их способность идентифицировать как известные, так и новые типы сетевых атак и вредоносных воздействий, в том числе вторжений, распределенных по времени [3].

В системах обнаружения вторжений IDS могут применяться самые разнообразные методы, способные проводить анализ сетевого трафика в режиме реального времени. Для различных сфер использования инфокоммуникационных сетей каждый из этих методов демонстрирует различную эффективность. В итоге разработчики систем

информационной безопасности инфокоммуникационных сетей и систем часто должны решить задачу правильного выбора и настройки систем IDS, которые будут максимально эффективными для данного конкретного объекта. Таким образом, существует потребность в критерии для их сравнительной оценки, чтобы выполнять их анализ в соответствии с этими критериями, производить их классификацию и анализировать полученные результаты.

В [4] приведен сравнительный анализ современных методов обнаружения сетевых атак и вредоносных вторжений, демонстрирующий, что наиболее эффективными и часто применяемыми выступают: алгоритм кластеризации (k-ближайших соседей), искусственные нейронные сети, генетические и роевые алгоритмы, метод опорных векторов, алгоритмы на базе искусственной иммунной системы. Но ни один из методов не гарантирует 100-процентное обнаружение вторжений как в целом, так и по отдельным видам атак. Кроме того, некоторые методы, обеспечивая высокий уровень распознавания аномальных ситуаций, также при этом генерируют большое количество ложных тревог, что может негативно сказаться на работе системы и сети в целом. Также разные методы лучше справляются с отдельными видами атак, практически пропуская другие их виды, особенно появившиеся недавно. Таким образом, разработка более эффективных методов обнаружения вторжений для систем IDS продолжает оставаться одной из самых актуальных задач в области информационной безопасности инфокоммуникационных сетей.

Целью данной работы является повышение эффективности функционирования систем обнаружения вторжений в инфокоммуникационных сетях путем модификации используемых в них интеллектуальных методов, обеспечивающих улучшение показателей по точности обнаружений аномалий и проценту ложных срабатываний.

Модуль интеллектуального анализа сетевого трафика в составе IDS является основным объектом исследований. Для качественного мониторинга атак его построение предполагается на базе машинного обучения, а именно – искусственных нейронных сетей (ИНС), обеспечивающих принятие решений об аномальных ситуациях и производимых атаках на основе анализа сетевого трафика.

**Нейросетевые модели для анализа сетевого трафика.** Нейронные сети (НС) являются наиболее популярными среди других методов машинного обучения [5]. В настоящее время они часто используются для IDS на основе аномалий. Наиболее популярными типами НС для IDS являются SOM и MLP. Различить другие сложнее: RBF, RNN и DBN встречаются редко.

Высокие показатели скорости обнаружения или точности доказывают жизнеспособность этих решений в их способности обнаруживать вредоносные данные. К сожалению, основная критика IDS на основе аномалий связана не с низкой точностью, а с высоким уровнем ложных срабатываний. Системный администратор не может использовать IDS, у которой несколько процентов предупреждений являются ложными тревогами: потеря времени будет просто слишком большой. Тем не менее, некоторые авторы не придают значения низкому уровню ложноположительных результатов. Вот почему они иногда предпочитают генерировать большое количество ложных тревог, чтобы получить увеличение скорости или точности обнаружения. Дальнейшая цель работы состоит в том, чтобы свести к минимуму как можно больше ложных срабатываний (в идеале менее одного процента), сохраняя при этом высокую точность, то есть создать сбалансированный компромисс.

Качественная разработка и дальнейшее успешное функционирование ИНС напрямую зависит от обучающей выборки, то есть множества примеров, на которых

ИНС обучается распознавать нормальные и аномальные ситуации, тестируется и проверяется. Задача обнаружения сетевых атак связана с выделением большого числа признаков, по которым можно будет проводить классификацию атак.

В сети Интернет выложено большое количество тестовых данных, на основе которых исследователи могут проводить свои разработки в сфере IDS. К этим наборам можно отнести [6]:

- KDD Cup 99;
- NSL-KDD;
- UNSW-NB15;
- Kyoto;
- WSN-DS;
- CICIDS 2017.

База данных атак UNSW-NB15 разработана в 2015 г. Она устраниет недостатки более ранних баз данных атак. База данных UNSW-NB15 включает около 2,5 млн записей о сетевых соединениях.

База данных UNSW-NB15 имеет 4 CSV файла. Каждая запись UNSW-NB15 включает 49 признаков трафика пяти типов: номинальные, целочисленные, числовые, временные, бинарные. Ознакомиться с полным перечнем признаков соединений UNSW-NB15 можно в [7]. Каждая запись о соединении соотносится с одним из десяти классов: нормальное соединение (Normal) или аномальное (атака) одного из девяти видов атак:

- Normal – передача нормальных данных;
- DoS – вредоносное вторжение, обеспечивающее перегруженность сервера, что затрудняет доступ авторизованным пользователям;
- Backdoors – незаметный обход системы безопасности (аутентификация) для получения доступа к компьютеру или его данным., то есть несанкционированный доступ к компьютеру, при этом атака остается незамеченной;
- Reconnaissance – атака сбора информации о сети для того, чтобы можно было обойти защитные системы;
- Worms – атакующий код копирует себя и распространяется на другие компьютеры. Может использовать сеть для распространения, выискивая сбои в безопасности компьютера, через который осуществляется доступ в сеть;
- Fuzzers – атака на сеть или программу. В этом случае на вход объекта атаки подаются случайно сгенерированные данные большого объема;

Для дальнейшей работы воспользуемся результатами исследований, приведенными в [8]. Здесь также использовался набор данных из базы UNSW-NB15 для проектирования нейронных сетей при помощи инструментария Automated Neural Networks пакета Statistica.

Сначала разработка нейронных сетей выполнялась с полным набором параметров, то есть на вход ИНС подавались 45 признаков трафика (без IP-адресов отправителя и получателя).

Входные множества варьировались от 100 000 до 700 000 записей и разбивались на обучающие, тестовые и проверочные. В частности, 70% входного множества использовались для обучения и по 15% для тестирования и проверки.

Далее в [8] проведено определение значимости параметров из набора UNSW-NB15 с целью сокращения числа входных параметров ИНС.

Для этого получены значения информативности параметров для всех исследуемых ИНС, разработанных на основе расширенного (700 000 записей) и

сокращенного (100 000 записей) входных множествах. Рассчитана средняя значимость для каждого признака по всех ИНС. Установлены наименее значимые параметры на основе расчета средних коэффициентов значимости для всех признаков по двум группам ИНС, разработанных на основе сокращенного и расширенного множеств.

Далее вычислены коэффициенты линейной корреляции для всех числовых признаков и выявлены группы линейно-зависимых параметров. Установлены 5 групп линейно- зависимых параметров. И, соответственно, при разработке ИНС с сокращенным числом параметров из каждой группы линейно- зависимых признаков выбран один, с максимальной значимостью.

Сокращение числа параметров дает возможность уменьшить входное множество признаков для ИНС до 32. Это положительно влияет на процесс обучения и тестирования ИНС и упрощает их дальнейшее использование.

Результаты модельного анализа, проведенного в [8] показали, что наименее значимые параметры определены верно, поскольку точность обучения, тестирования и проверки для каждой ИНС не меньше 98,8%

Таким образом, в дальнейшей работе воспользуемся сокращенным числом параметров множества UNSW-NB15, приведенным в [8]. В нашем случае для обучения ИНС выборка состоит из 80000 записей, для тестирования – из 20000 записей, количество признаков по каждой записи составляет 32.

Кроме того, принято решение обучать сеть не на все 9 видов атак, представленных в базе UNSW-NB15, а на четыре наиболее распространенные:

- DoS;
- Fuzzers;
- Generic;
- Exploits.

Критерии оценки различных механизмов распознавания нормальных и аномальных ситуаций основываются на четырех показателях: TP, TN, FP и FN [9]:

- TP (true positive – положительный) – количество правильно классифицированных атак;
- TN (true negative – отрицательный) – количество правильно классифицированных нормальных ситуаций;
- FP (false positive – ложноположительный результат) – количество ошибочно классифицированных атак;
- FN (false negative – (ложноотрицательный) – количество ошибочно классифицированных нормальных записей.

На основе этих показателей выделяют критерии оценивания:

Точность обнаружения (accuracy) – процент правильно классифицированных записей, положительных и отрицательных, по всем строкам набора данных, рассчитывается по формуле:

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (1)$$

FPR (False Positive Rate) – доля ложноположительных результатов и FNR (False Negative Rate) – доля ложноотрицательных результатов рассчитываются в соответствии с формулами (2) и (3):

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN}, \quad (2)$$

$$FNR = \frac{FN}{FN + TP}, \quad (3)$$

FAR (False Alarm Rate) – частота ложных срабатываний, отражает долю ошибочно классифицированных записей, рассчитывается по формуле (4):

$$FAR = \frac{FPR + FNR}{2}, \quad (4)$$

Уравнения (1–4) оценивают эффективность и надежность механизма принятия решений.

Обнаружение с наивысшим уровнем доверия достигается, когда значение точности обнаружения приближается к 100%, а FAR приближается к 0%.

Количество нейронов во входном слое определяется количеством признаков сетевого трафика, которое равно 32, количество нейронов в выходном слое равно количеству детектируемых атак плюс нормальный трафик, то есть 5. Количество нейронов в скрытом слое задается случайным образом, затем перебором различных вариантов определяется оптимальный с точки зрения минимальной ошибки обучения и показателей тестирования.

Модельное исследование трех различных видов нейронных сетей, построенные на базе многослойного персептрона (MLP), сети радикально-базисных функций (RBF) и самоорганизующейся карты Кохонена (SOM). Сравнительные результаты по точности обнаружения аномалий в процессе тренировки и тестирования сетей демонстрируют, что наибольшую точность дает нейронная сеть SOM: порядка 99,8% при обучении и 99,2 % при тестировании. Нейронная сеть RBF демонстрирует по соответствующим показателям значения 99,7 % и 93,1%. Нейронная сеть MPL – 99,6% и 96,2% соответственно.

Сравнительные результаты по количеству ложных срабатываний в процессе тестирования сетей демонстрируют, что наилучший показатель дает нейронная сеть MLP – порядка 1,8%. Нейронная сеть RBF демонстрирует значение 2,6 %. Нейронная сеть SOM – 7,5 %.

Эффективность работы модуля интеллектуального анализа сетевого трафика в составе IDS можно повысить, используя для анализа записей о потоке несколько нейронных сетей. В данной работе предлагается использовать три различные нейронные сети, построенные на базе многослойного персептрона (MLP), сети радикально-базисных функций (RBF) и самоорганизующейся карты Кохонена (SOM).

На вход каждой нейронной сети поступает один и тот же сетевой трафик. Нейронные сети анализируют заголовки IP-пакетов, при этом одновременно можно производить поиск сигнатур вторжений непосредственно в содержимом прикладного уровня IP-пакетов. В процессе детектирования каждая нейронная сеть определяет, соответствуют ли поданный сетевой пакет аномальной или нормальной ситуации.

Выход каждой нейронной сети представляет собой многомерный вектор, каждая координата которого соответствует одному из видов атак или их отсутствию. Если нейронная сеть определяет атаку, соответствующая координата вектора принимает единичное значение, в противном случае – нулевое значение. Аналогично координата отсутствия атаки принимает единичное значение, если таковая не детектируется.

Разные нейронные сети могут детектировать различные типы атак. Например, для определенной записи одна нейронная сеть опередит атаку как «Получение удаленного доступа», другая – как «Повышение привилегий», а третья – отсутствие атаки.

Определим количество вариантов ответов, которые может выдать модуль интеллектуального анализа сетевого трафика, включающий три различные нейросети.

Каждая нейросеть может выдать два типа ответов: нормальное состояние или аномалия. В свою очередь, аномалии могут быть четырех типов. Имеем задачу комбинаторики по определению количества сочетаний с повторениями из  $n$  объектов по  $k$ . То есть, необходимо определить, сколькими способами можно составить комбинацию из  $k$  элементов из  $n$  элементов  $n$  типов. При этом возможны повторения отдельных элементов в комбинации, не важен их порядок. Формула имеет вид:

$$\bar{C}_n^k = C_{k+n-1}^k = \frac{(k+n-1)!}{(n-1)!k!}, \quad (5)$$

где  $k = 3$  – количество нейросетей;  $n = 4$  – количество вариантов ответов каждой нейросети.

Согласно (5) получаем количество вариантов ответов, которые может выдать модуль интеллектуального анализа сетевого трафика:

$$\bar{C}_n^k = C_4^3 = \frac{(3+5-1)!}{(5-1)! \cdot 3!}.$$

Рассмотрим эти варианты. Самыми однозначными являются варианты, когда все три нейросети дают одинаковый результат. Остальные варианты – неоднозначны. При этом наиболее сложными являются варианты, когда все три нейросети дают разные результаты.

Поскольку модуль интеллектуального анализа сетевого трафика должен выдать конкретный результат, введем в него дополнительный результирующий блок, на три входа которого синхронно поступают результаты анализа сетевого трафика от трех нейронных сетей, а выходом будет окончательный результат анализа всего модуля (рис. 1). Рассмотрим работу блока, принимающего решения об аномальной или нормальной ситуации на основе результатов анализа сетевого трафика тремя ИНС.

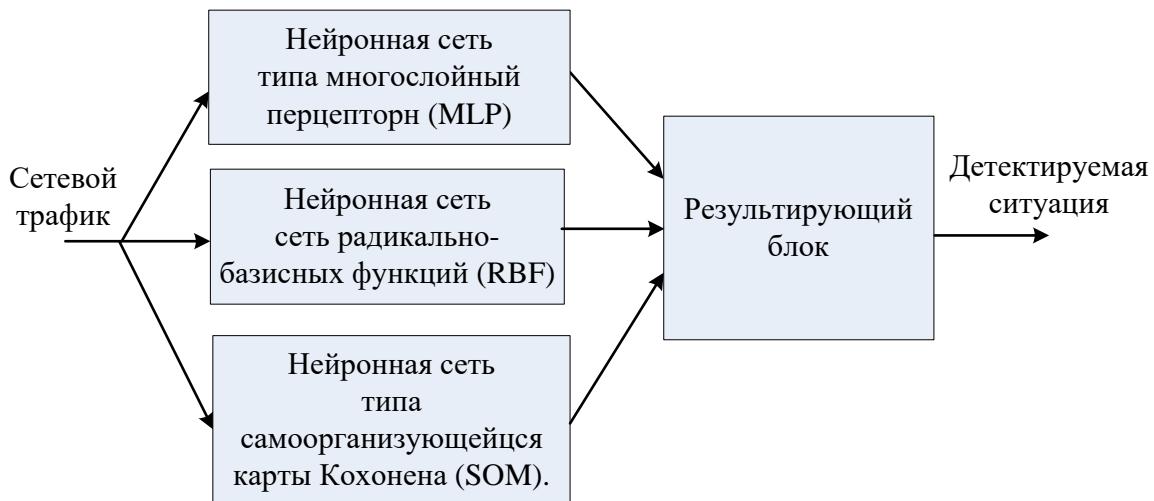


Рис. 1. Схема модуля интеллектуального анализа сетевого трафика

Обозначим через  $X$  – вектор, характеризующий ситуацию, то есть детектируется ли атака, какого она типа или атаки отсутствует. При этом его элементы  $x_i, i = 1, 2, 3, 4$  характеризуют атаку соответствующего типа, а элемент  $x_0$  – отсутствие атаки.

Соответственно, детектируемое состояние  $j$ -ой нейронной сетью, обозначим через  $NN_i^j, i = 0\dots 4, j = 1\dots 3$ . Оно принимает значение 1 или 0. Например, если вторая нейронная сеть детектировала атаку 4-го типа, то  $NN_4^2 = 1$ , а  $NN_1^2 = NN_2^2 = NN_3^2 = NN_0^2 = 0$ .

Каждый элемент вектора  $X$  определяется по формуле:

$$x_i = \sum_{j=1}^3 NN_i^j. \quad (6)$$

В (6)  $x_i$  может принимать значения 0, 1, 2 или 3. Значение  $x_i = 0$  говорит о том, что ни одна нейронная сеть не детектировала это состояние,  $x_i = 1$  – что это состояние детектировала только одна из нейронных сетей,  $x_i = 2$  – что это состояние детектировали две нейронные сети из трех и  $x_i = 3$  – все три нейронные сети одинаково охарактеризовали ситуацию.

Результирующее значение определим как:

$$R = i_{\max},$$

где  $i_{\max}$  – индекс элемента, принимающего максимальное значение в векторе  $X$ .

Неопределенность возникает, когда несколько элементов имеют максимальные значения. Такая ситуация возможна только тогда, когда все три нейронные сети выдали разные результаты. То есть три из пяти состояний будут характеризоваться через  $x_i = 1$ .

Для устранения этой неопределенности введем коэффициенты значимости нейронных сетей  $A_j$ , которые будут характеризовать степень доверия к результатам, выдаваемым каждой нейронной сетью. Поскольку результаты модельного эксперимента говорят о том, что наиболее качественно работает сеть Кохонена, которая имеет индекс  $j = 3$ , то дадим ей наибольший коэффициент значимости  $A_3 = 1,1$ , а нейронной сети на основе многослойного персептрона, которая имеет индекс  $j = 1$ , дадим наименьший коэффициент значимости  $A_1 = 0,9$ . Соответственно, радиально-базисная сеть получит средний коэффициент значимости  $A_2 = 1,0$ .

Соответственно, формула (6) примет вид:

$$x_i = \sum_{j=1}^3 A_j \cdot NN_i^j. \quad (7)$$

В процессе мониторинга сетевого трафика вся IDS или отдельные нейросети в ее составе могут допускать некоторые ошибки. Например, отсутствие сообщений об атаках, хотя они производятся, или, ложные срабатывания при безопасном трафике.

Однако при настройке системы IDS ее пользователь стремится к достижению наилучшего компромисса или оптимального решения, которое сводит количество ложных срабатываний к минимуму и пытается обнаружить как можно больше реальных атак. Во многих случаях снижение частоты ложно положительных результатов одновременно демонстрирует увеличение частоты ложноотрицательных результатов. Таким образом, часто необходимо искать компромисс между обнаружением всех аномалий (но, сигналы тревоги подаются слишком часто) и минимумом сообщений об обнаруженных аномалиях, но и отсутствием ложных тревог.

При этом, в зависимости от ситуации может существовать несколько оптимальных стратегий.

Например, если IDS передает результаты анализа в другую интеллектуальную систему, например, модуль управления предупреждениями, то может допускаться больше ложных срабатываний, так как они будут отфильтрованы модулем управления предупреждениями на более позднем этапе. Однако, если IDS передает результаты анализа непосредственно системному администратору, система может выдавать предупреждения слишком часто. Кроме того, тип отслеживаемой атаки и ее влияние на контролируемую инфраструктуру, может повлиять на то, насколько опасно пропускать эту атаку. Поэтому при поиске оптимального решения следует учитывать политику безопасности высокого уровня.

Обычно вопрос оптимальности оставляют на усмотрение разработчика конкретной системы или обслуживающего ее ИТ-персонала.

В данной работе предлагается учесть требования верхнего уровня политики безопасности настройкой параметров IDS для обеспечения оптимальной работы согласно описанному выше компромиссу.

Для этого в формулу (7) введем дополнительные коэффициенты значимости политики безопасности  $B_i$ . Значение  $B_i$  тем выше, чем важнее распознавание ситуации  $i$ -го типа для политики безопасности. Например, если политика безопасности требует максимального распознавания DoS-атак, то максимальное значение примет коэффициент  $B_2$ . Если системе не так важно пропустить атаку, чем перегружать администратора ложными срабатываниями, то максимальное значение примет коэффициент  $B_0$ . В целом же формула (8) примет вид:

$$x_i = B_i \sum_{j=1}^3 A_j \cdot NN_i^j.$$

Сравнительный модельный анализ качества функционирования модифицированного модуля интеллектуального анализа сетевого трафика системы IDS и рассмотренных ранее отдельных нейронных сетей представлен на рис. 2–3.

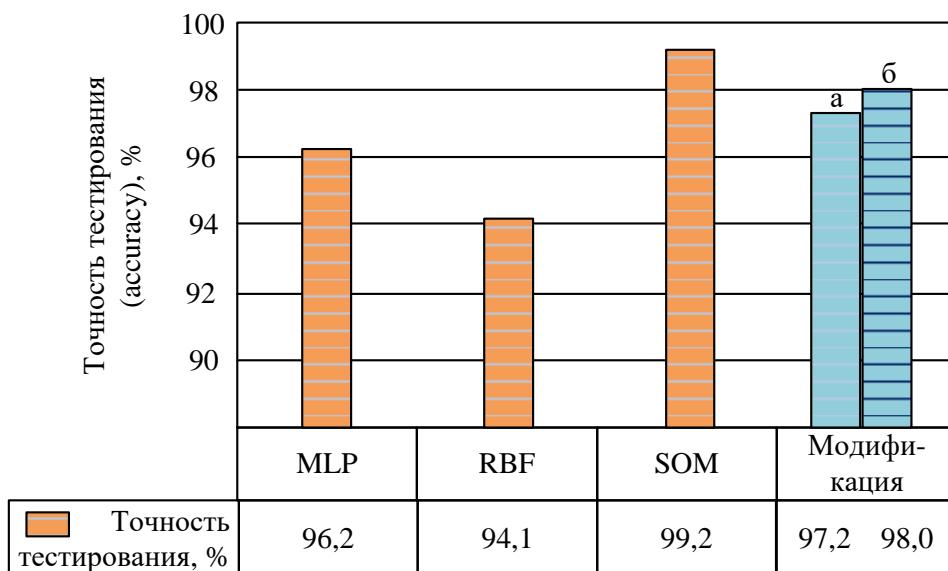


Рис. 2. Результаты модельного исследования модуля интеллектуального анализа сетевого трафика по показателю «точность обнаружения аномалий»

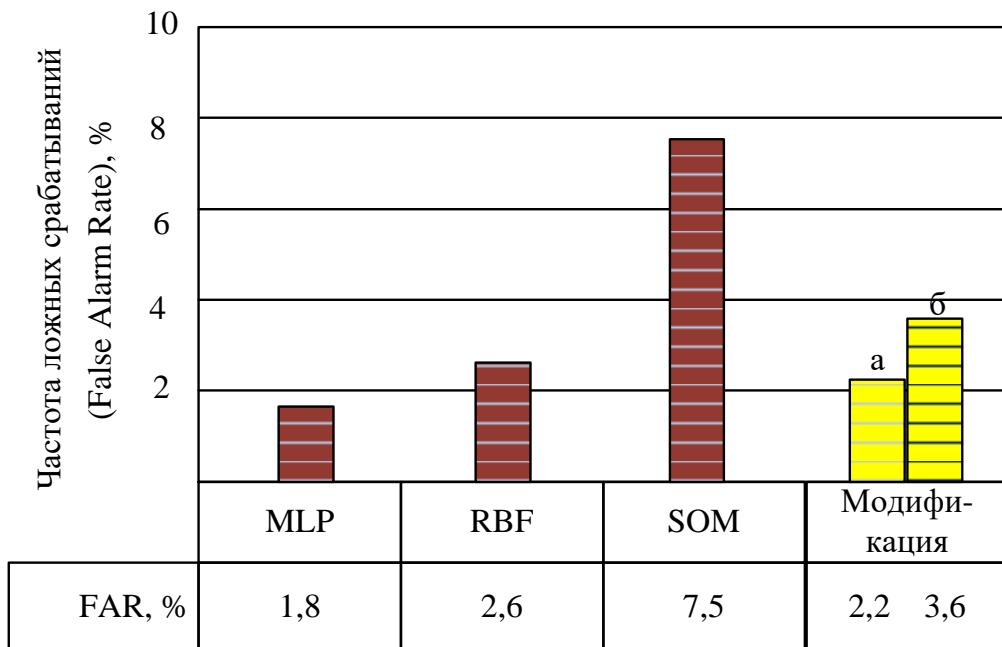


Рис. 3. Результаты модельного исследования модуля интеллектуального анализа сетевого трафика по показателю «число ложных срабатываний»

Таким образом, по результатам анализа видно, что предложенная модификация модуля интеллектуального анализа сетевого трафика системы IDS на основе нескольких нейронных сетей позволяет адаптировать поведение системы IDS под требования вышестоящей системы, например, администратора сети.

**Выводы.** В статье проведено исследование нейросетевых моделей для анализа сетевого трафика в системах IDS. Анализ литературы показал, что из всего многообразия искусственных нейронных сетей только некоторые из них имеют свойства, позволяющие им успешно применяться для анализа сетевого трафика на предмет аномалий в реальном времени. Выделены три модели: многослойного персептрона (MLP), сети радикально-базисных функций (RBF) и самоорганизующейся карты Кохонена (SOM).

В качестве исходных данных для обучения и тестирования ИНС выбрана открытая база данных атак UNSW-NB15. Для обучения ИНС выборка состоит из 80000 записей, для тестирования – из 20000 записей, количество признаков по каждой записи – 32.

Приняты критерии оценки различных механизмов распознавания нормальных и аномальных ситуаций: точность обнаружения и частота ложных срабатываний.

Результаты модельного исследования показали, что наибольшую точность дает нейронная сеть SOM: порядка 99,8% при обучении и 99,2 % при тестировании. Нейронная сеть RBF демонстрирует по соответствующим показателям значения 99,7 % и 93,1%. Нейронная сеть MPL – 99,6% и 96,2% соответственно. Наилучший показатель по количеству ложных срабатываний дает нейронная сеть MLP – порядка 1,8%. Нейронная сеть RBF демонстрирует значение 2,6 %. Нейронная сеть SOM – 7,5 %.

Предложена модификация модуля интеллектуального анализа сетевого трафика на основе трех различных ИНС, которая позволяет адаптировать поведение системы IDS под требования вышестоящей системы.

## **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Корниенко, А. А. Системы обнаружения вторжений: современное состояние и направления совершенствования [Электронный ресурс] / А. А. Корниенко, И. М. Слюсаренко. – Режим доступа: [http://citforum.ru/security/internet/ids\\_overview](http://citforum.ru/security/internet/ids_overview) (дата обращения: 12.04.2022). – Текст: электронный.
2. Кузнецов, А. А. Статистический анализ сетевого трафика для систем обнаружения и предотвращения вторжений / А. А. Кузнецов, А. А. Смирнов, Д. А. Даниленко, А. Березовский // Радиотехника. – 2014. – Вып. 176. – С. 97–110.
3. Васильев, В. И. Обнаружение атак в локальных беспроводных сетях на основе интеллектуального анализа данных / В. И. Васильев, И. В. Шарабыров // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 2. – С. 57–67.
4. Фролов, П. В. Исследование методов обнаружения сетевых атак / П. В. Фролов, Е. В. Вершинин, С. А. Медведева // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. – № 11. – С. 55–59.
5. Кожевникова, И. С. Контролируемые методы машинного обучения как средство детектирования сетевых вторжений / И. С. Кожевникова, Е. В. Ананьев, А. В. Лысенко, А. В. Никишова // Молодой ученый. – 2016. – № 27 (131). – С. 20–23.
6. Шелухин, О. И. Анализ информативных признаков в задачах обнаружения аномалий трафика статистическими методами / О. И. Шелухин, Р. А. Судариков // Технологии информационного общества : Тезисы научно-технических секций, Москва, 20–21 февраля 2014 года. – Москва: Северо-Кавказский филиал Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования "Московский технический университет связи и информатики", 2014. – С. 85–86. – EDN VRLNST.
7. Системы обнаружения и предотвращения вторжений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://itland.com.ua/solutions/network-security/intrusion-detection-prevention-systems> (дата обращения: 12.04.2022). – Текст: электронный.
8. Суворов, А. О. Интеллектуальный анализ сетевого трафика для идентификации компьютерных вторжений / А. О. Суворов, В. А. Суворова // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2019. – № 1. – С. 62–73. – DOI 10.14357/20718594190106. – EDN VXNOYH.
9. Bottou, L. Large-scale machine learning with stochastic gradient descent / L. Bottou // Proceedings of COMPSTA, 2010. P. 177–186.

*Поступила в редакцию 30.01.2023 г., рекомендована к печати 15.02.2023 г.*

## **A MODULE FOR INTELLIGENT NETWORK TRAFFIC ANALYSIS IN INTRUSION DETECTION SYSTEMS BASED ON A SET OF NEURAL NETWORKS**

**Strizhko M.A., Chervinskii V.V., Turupalov V.V.**

The study of neural network models for analyzing network traffic in IDS systems is carried out. An open database of attacks was selected as the source data for training and testing artificial neural networks. Criteria for evaluating various mechanisms for recognizing normal and abnormal situations have been adopted: the accuracy of detection and the frequency of false positives. A modification of the software module for intelligent network traffic analysis based on three neural networks is proposed, which allows improving the accepted evaluation criteria and adapting the behavior of the IDS system to the requirements of a higher-level system.

**Keywords:** neural network, network traffic, data analysis, false alarm, attack, intrusion, detection accuracy.

**Стрижко Михаил Александрович**

ассистент кафедры автоматики и телекоммуникаций ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.

Email: strizhko.mihail@yandex.ru

**Strizhko Mikhail Aleksandrovich**

Assistant of the Department of Automation and Telecommunications of Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Червинский Владимир Владимирович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики и телекоммуникаций ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
Email: tscherwi@mail.ru

**Chervinskii Vladimir Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Automation  
and Telecommunications of Donetsk National  
Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Турупалов Виктор Владимирович**

кандидат технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой автоматики и  
телекоммуникаций ГОУ ВПО «Донецкий  
национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
Email: tvv@mail.ints.net

**Turupalov Viktor Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of  
the Department of Automation and  
Telecommunications of Donetsk National Technical  
University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

## И Н Ф О Р М А Ц И О Н Н Ы Е Т Е Х Н О Л О Г И И И Т Е Л Е К ОММУНИКАЦИИ

УДК 681.5:621.377

### ЭЛЕМЕНТЫ УСТРОЙСТВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ ДЛЯ АСНИ КОНТРОЛЯ РАДИООБСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ЭХО-ЭФФЕКТА

© 2023 Третьяков И.А., Данилов В.В., Борщевский С.В.

В данной работе приведены описания элементов устройств вычислительной техники для создания специализированных автоматизированных систем научных исследований контроля радиообстановки на основе эхо-эффекта. Приведен механизм формирования фотонного эха. Рассмотрена корреляционно-фильтрационная обработка сигналов с линейной частотной модуляцией и фазокодовой модуляцией бинарной М-последовательностью максимальной длины.

**Ключевые слова:** АСНИ, радиообстановка, эхо-эффект, спиновое эхо, фононное эхо, эхо-процессор, обработка радиосигналов.

**Введение.** Важнейшим элементом современной концепции защиты информации является контроль радиообстановки - обнаружение, идентификация, локализация и изучение источников электромагнитного излучения в рамках контролируемого объекта. Кроме того, широко известна проблема информационной безопасности электромагнитных излучений и наводок в средствах вычислительной техники [1]. Однако, контроль и прогнозирование сложных процессов по многочисленности и разнообразию вычислений невозможен без создания автоматизированных систем научных исследований (АСНИ) [2-4]. Широкие перспективы создания устройств оптимальной обработки радиосигналов для таких АСНИ связаны с применением таких физических явлений, как эхо-эффект [5, 6]. По мере накопления знаний о таких физических явлениях, потенциально пригодных для создания устройств вычислительной электроники, будут расширяться и области их практического применения.

Для практической реализации эхо-процессоров используются явления спинового эха на системе ядерных спинов (спиновое эхо) или акустических колебаний в пьезоэлектронике (фононное эхо) [7, 8]. Носителем информации в этих случаях являются колебания спинов ядер или атомов решетки, а активной средой - объем твердого тела (рабочее тело). С помощью подобных устройств можно осуществлять задержку радиосигналов, сжатие частотно-модулированных сигналов, согласованную полосовую фильтрацию, корреляцию и автокорреляцию и т.д. [9]. Кроме того, такие устройства могут успешно осуществлять обработку аналоговых сигналов, не нуждаясь в предварительном преобразовании сигнала в цифровой, благодаря чему обработка совершается в режиме реального времени [10].

Хорошие массогабаритные и энергетические характеристики, а также высокая надежность и быстродействие делают эхо-процессоры весьма перспективными функциональными блоками, способными обеспечить решение задач по созданию автоматизированных информационно-измерительных систем нового поколения, использующей новые физические принципы и явления [11].

Помимо спиновых процессоров, перспективными элементами устройств оптимальной обработки радиосигналов являются фотонные эхо-процессоры, которые обладая аналогичными функциональными возможностями, позволяют реализовать память до нескольких суток в диапазоне частот 5 – 100 МГц. Явление фононного эха заключается в том, что кристаллический порошок ряда пьезоэлектриков, помещенный, например, в плоский конденсатор колебательной системы и подвергнутый воздействию определенной последовательности электромагнитных импульсов от внешнего генератора, сам излучает электромагнитный импульс той же частоты в некоторый следующий момент времени (через время задержки).

**Механизм формирования сигналов фононного эха.** Электрическая компонента первого высокочастотного импульса, поданного в момент времени  $t = 0$  на колебательную систему с рабочим веществом, возбуждает в кристаллах порошка за счет линейного пьезоэффекта упругие волны (фононы) тех же частот. С течением времени происходит рассогласование упругих волн по фазе из-за различия скоростей распространения для волн разной поляризации, из-за различия в направлениях волнового вектора, из-за упругого рассеяния на дефектах кристаллов. Электрическое поле второго высокочастотного импульса в момент времени  $t = \tau$ , взаимодействуя с упругими волнами, возбуждаемыми первым импульсом, приводит за счет диэлектрической нелинейности кристаллов к рождению упругих волн с теми же частотами, с теми же фазовыми соотношениями, но с противоположными направлениями волнового вектора.

Если упругие волны рассогласовались по фазе, распространяясь в прямом направлении в течение времени  $\tau$ , то при распространении в обратном направлении они снова окажутся в фазе через такой же интервал времени  $\tau$ . В результате в момент времени  $t = 2\tau$  сфазированные упругие волны (фононы) создадут за счет обратного пьезоэффекта электрический сигнал тех же частот, который представляет собой сигнал двухимпульсного эха [12], обычно используемый в качестве динамической задержки в оперативных запоминающих устройствах.

Наиболее интересными и уникальными свойствами обладает трехимпульсное фононное эхо. Процесс образования трехимпульсного эха определяется тем, что взаимодействие между упругими волнами, возбужденными первым импульсом и электрическим полем второго импульса, приводит за счет нелинейных эффектов к образованию в кристалле электрического поля и механического напряжения, постоянных во времени и периодических в пространстве с периодом упругой волны, т. е. приводит к записи упругой волны в момент времени  $\tau$ . Такая запись является фактически акустической голограммой. Для того чтобы такая запись не исчезала после окончания действия второго импульса и затухания звуковой волны, необходима фиксация ее при помощи, например, перераспределения тока на примесных уровнях. Электрическое поле третьего импульса действуя на такой электрический рельеф в момент времени  $T$ , порождает упругие волны с противоположным направлением волнового вектора. Так же как и в случае двух импульсного эха, эти волны окажутся в фазе через время  $\tau$  после подачи третьего импульса, т. е. дадут сигнал стимулированного эха в момент времени  $T + \tau$ . Образованный «электрический рельеф» на дислокациях и дефектах кристаллической решетки может существовать несколько суток, что и определяет время памяти  $T_1$  при трехимпульсной методике [12]. Временная диаграмма образования эхо-сигналов показана на рис. 1.

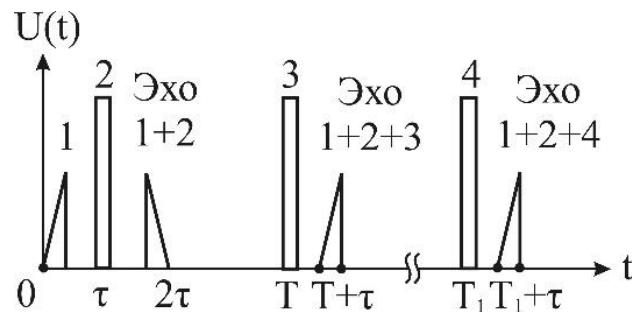


Рис. 1. Временная диаграмма образования фононного эха

Полученные сигналы фононного эха обусловлены электрической компонентой переменного высокочастотного поля, создаваемой пьезоэлектрическими колебаниями отдельных кристалликов. Этими колебаниями индуцируется периодический макроскопический электрический дипольный момент, который наводит на обкладках конденсатора, между которыми находится рабочее тело, хорошо наблюдаемый сигнал фононного эха. Его интенсивность может достигать 0,1 – 1,0 В. Изменение рабочей частоты импульсов возбуждения подключает к участию в фононном эффекте кристаллики с другими линейными размерами, что обеспечивает наблюдение эха в диапазоне частот от единиц до сотен мегагерц.

**Практическая реализация.** В качестве примера использования фононного эхо-процессора рассмотрим корреляционно-фильтрационную (временное сжатие) обработку сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛКМ) и фазокодовой модуляцией (ФКМ) бинарной М-последовательностью максимальной длины. Структурная схема фононного эхо-процессора (рис. 2) содержит сумматор обрабатываемых и вспомогательный сигналов, усилитель мощности, нагрузкой которого является колебательный контур с рабочим телом, помещенным между обкладками конденсатора, усилитель сигналов фононного эха и индикатор.

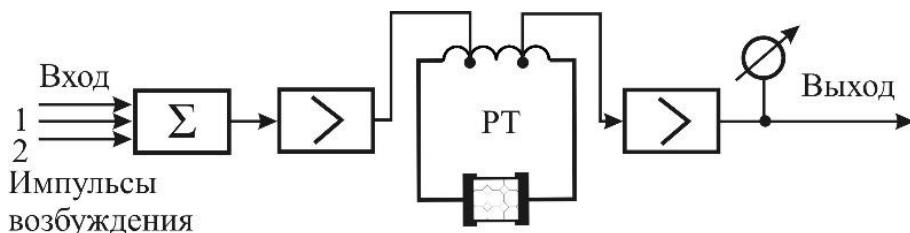


Рис. 2. Структурная схема фононного эхо-процессора

Для уверенного возбуждения сигналов фононного эха амплитуда напряжения возбуждающих импульсов на конденсаторе с рабочим телом должна лежать в пределах 20–100 В. При этом максимальная мощность, выделяемая в контуре, составляет 3–4 Вт.

В рассмотренном примере в качестве вещества рабочего тела могут быть использованы [13, 14]: порошок ниобата лития, легированного в процессе роста кристаллов ионами двухвалентного железа ( $LiNbO_3 + 0,4\% \text{ вес. } Fe$ ), германата висмута  $Bi_{12}GeO_5$  и калия бромоватокислого  $KBrO_3$  с размерами частиц в диаметре не более 50 мкм. Конструктивно зазор между обкладками цилиндрического конденсатора должен составлять 0,8 мм, емкость конденсатора с веществом ориентировочно лежит в пределах 25 – 40 пФ. Экспериментальная проверка макета проводились в диапазоне частот 60 – 80 МГц. Результаты исследования приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты обработки сигналов с ЛЧМ модуляцией

Вещество	$\tau_0$ , мкс	$\Delta f$ , МГц	$\tau$ , мкс	T, ч	$\tau_0$ , мкс	Выходное напряжение, В		Переходное затухание, дБ	
						двуихим- пульсное эхо	трехим- пульсное эхо	двуихимпу- льсное эхо	трехимпул- ьсное эхо
LiNbO <sub>3</sub>	30	2,5	30	24	0,6	0,4	0,19	-45	-51,4
Bi <sub>12</sub> GeO <sub>20</sub>	30	2,5	30	24	0,6	0,6	0,17	-44,4	-55,4
KBrO <sub>3</sub>	30	2,5	30	24	0,6	0,05	0,03	-66	-70,4

Сжатие сигналов с фазокодовой модуляцией бинарной M-последовательностью проводилось по схеме, показанной на рис. 3.

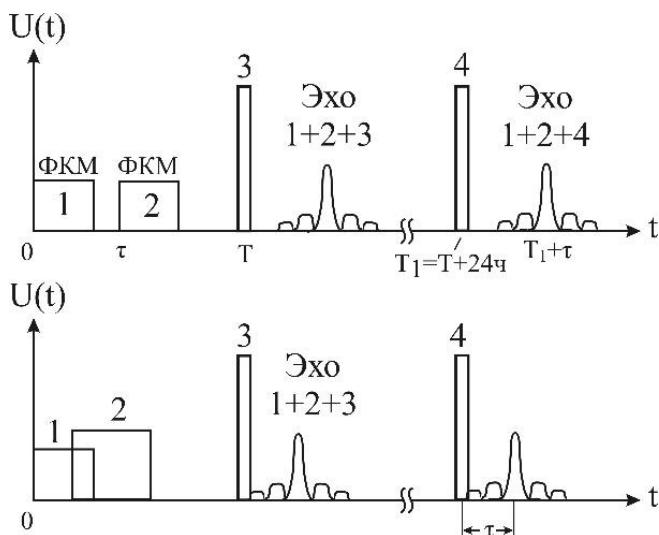


Рис. 3. Схема сжатия ФКМ-сигналов

Длительность элементарного импульса M-последовательности составляет 0,5 мкс, число элементов последовательности – 127, длительность короткого считающего импульса – 0,5 мкс. Результаты экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты обработки сигналов с ФКМ модуляцией

Вещество	$\tau_0$ , мкс	$\Delta f$ , МГц	$\tau$ , мкс	T, ч	$\tau_0$ , мкс	U, В	Переходное затухание, дБ
LiNbO <sub>3</sub>	63,5	2,5	5	24	0,6	0,57	-45
Bi <sub>12</sub> GeO <sub>20</sub>	63,5	2,5	5	24	0,6	0,49	-48

После отключения всех взаимодействующих импульсов сжатый сигнал фононного эха можно вновь получить путем подачи только одного третьего импульса (рис. 3). Эта память сохраняется в течение нескольких суток. Широкополосность рабочего вещества позволяет обрабатывать в фононном эхо-процессоре одновременно и независимо нескольких сигналов, не перекрывающихся по спектру.

**Выводы.** Таким образом, фононный эхо-процессор при практических любых заданных воздействиях является аналогом согласованного фильтра, обладающего как динамической памятью при двухимпульсном режиме сжатия, так и квазистатической (долговременной) памятью при трехимпульсном режиме сжатия. Последнее свойство позволяет многократно обращаться к памяти эхо-процессора, что может быть очень ценным при специфических методах обработки радиосигналов. Следует ожидать, что фононные эхо-процессоры в ближайшем будущем найдут применение в специальных автоматизированных информационно-измерительных системах, а также в автоматизированных системах научных исследований контроля радиообстановки (радиомониторинг, радиолокация, радиоразведка, целенаведение и др.).

## **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Третьяков, И. А. Проблемы информационной безопасности электромагнитных излучений и наводок в средствах вычислительной техники / И. А. Третьяков, Я. И. Рушечников // Информационные системы и технологии : материалы междунар. науч. конгресса по информатике. В 3 ч. (Беларусь, Минск, 27–28 октября 2022 г.). – Ч. 1. – Минск: БГУ, 2022. – С. 108-112. – EDN GTKGIM.
2. Семенова, И. И. Концепция автоматизированной системы поддержки научных исследований / И. И. Семенова, А. А. Швебель // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – № 3. – С. 76-80. – EDN LDEMDL.
3. Снежко, В. Л. Разработка системы автоматизации экспериментальных исследований / В. Л. Снежко, М. С. Палиивец, А. В. Подобный // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2022. – №10-2. – С. 118-120. – DOI 10.24412/2500-1000-2022-10-2-118-12. – EDN ZUWLLM.
4. Данилов, В. В. Исследование параметров поверхностных акустических волн посредством АСН / В. В. Данилов, И. А. Третьяков // Донецкие чтения 2022: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы VII Международной научной конференции, посвящённой 85-летию Донецкого национального университета (Донецк, 27–28 октября 2022 г.). – Том 2: Физические, технические и компьютерные науки / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2022. – С. 182-184. – EDN MMODGO.
5. Третьяков, И. А. Анализ направлений развития устройств обработки сигналов на принципах функциональной электроники / И. А. Третьяков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 4-8. – EDN MRWWQD.
6. Соколов, С. А. Оптимальная обработка сложных сигналов при помощи эффекта спинового эха / С. А. Соколов // Сб. трудов Рязанского радиотехнического института. – №5. – 2001. С. 74 – 81.
7. Третьяков, И. А. Обоснование физических основ устройств функциональной электроники для практической реализации систем и сетей телекоммуникаций / И. А. Третьяков // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2021. – № 5(47). – С. 136-140. – EDN SDENXH.
8. Пухлий, В. А. К задаче спинового эха в теории ядерного магнитного резонанса / В. А. Пухлий, Н. И. Ковалев // Евразийский Союз Ученых. – 2015. – №7-6 (16). – С. 32-38. – EDN UPAPNL.
9. Третьяков, И. А. Возможности применения спинового эха при создании многофункциональных систем обработки радиосигналов / И. А. Третьяков // Интеллектуальные информационные системы: труды Международной научно-практической конференции (Воронеж, 08-10 февраля 2022 г.) / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. – С. 113-116. – EDN QBCWTH.
10. Третьяков, И. А. Спектральный анализ радиосигналов в реальном времени на основе применения эхо-эффекта / И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: управление, вычислительная техника и информатика. – 2022. – № 1. – С. 53-59. – DOI 10.24143/2072-9502-2022-1-53-59. – EDN QIFWWI.
11. Федотов, Я. А. Функциональная электроника / Я. А. Федотов. – Москва : Высш. шк., 2012. – 455 с.
12. Третьяков, И. А. Особенности построения многоканальных систем связи на устройствах с эхо-эффектом / И. А. Третьяков // 65-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета (Астрахань, 26–30 апреля 2021 г.): материалы / Астраханский государственный технический университет. – Астрахань : Изд-во АГТУ, 2021. – С. 607-611. – EDN JDRWJR.

13. Куневич, А. В. Материалы для устройств на эффекте спинового эха / А. В. Куневич, В. В. Филиппов // Обзоры по электронной технике. Сер. 6. Материалы. – 1980. – №7 (749). – 40 с.
14. Третьяков, И. А. Перспективные материалы и технологические особенности разработки устройств телекоммуникаций на основе эхо-эффекта / И. А. Третьяков // Донецкие чтения 2021: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы VI Международной научной конференции (Донецк, 26-27 октября 2021 г.). – Том 2: Физические и технические науки / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2021. – С. 183-186. – EDN WDGKVB.

*Поступила в редакцию 23.01.2023 г., рекомендована к печати 10.02.2023 г.*

**ELEMENTS OF COMPUTING DEVICES FOR ASRS CONTROL OF RADIO PLACEMENT  
BASED ON THE ECHO EFFECT**

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

This paper describes the elements of computer technology devices for the creation of specialized automated scientific research systems of radio control based on the echo effect. The mechanism of photon echo formation is given. Correlation and filtering processing of signals with linear frequency modulation and phase modulation by a binary M-sequence of maximum length is considered.

**Keywords:** ASRS, radio substitution, echo effect, spin echo, phonon echo, echo processor, radio signal processing.

**Третьяков Игорь Александрович**

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

**Tretiakov Igor Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean for Research, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Данилов Владимир Васильевич**

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

**Danilov Vladimir Vasilevich**

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

**Борщевский Сергей Васильевич**

доктор технических наук, профессор, проректор (по научной работе) ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: borschhevskiy@mail.ru

**Borshchevskii Sergei Vasilevich**

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Vice-Rector (of Scientific Work) of Donetsk National Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ПРИ РАСЧЕТАХ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

© 2023 Аверин Г.В., Звягинцева А.В., Самолихин В.В.

Одним из основных факторов формирования теплового режима в горных выработках являются влагообменные процессы. Однако они отличаются выраженной случайностью и в аналитических моделях сложно поддаются описанию в связи с нелинейностью. Поэтому актуально дальнейшее развитие методов тепловых расчетов, направленных на учет массообменных процессов. Проведен сравнительный анализ аналитических и вероятностных моделей прогнозирования тепловлажностных условий в горных выработках. Получены расчетные зависимости, характеризующие процессы влагообмена между горным массивом и рудничным воздухом. Показано, что использование двух абсолютно независимых методов прогнозирования параметров воздуха в выработках дает возможность повысить достоверность выполняемых прогнозов.

**Ключевые слова:** горные выработки, тепловлагоперенос, аналитические и вероятностные модели, расчеты температуры и влагосодержания, вычислительные эксперименты.

**Введение.** Многие горные предприятия для поддержания и увеличения мощности добычи полезных ископаемых сталкиваются с необходимостью разработки залежей на глубоких горизонтах. При увеличении глубины ведения горных работ возрастает температура породного массива и ухудшаются параметры микроклимата в горных выработках.

Одним из основных факторов, формирующих тепловой режим шахт и рудников, является тепловлагообмен между горными породами и рудничным воздухом. В результате температура воздуха в горных выработках повышается до сверхнормативных величин, хотя согласно действующим нормам температура воздуха не должна превышать +26°C [1]. Высокая температура воздуха отрицательно влияет на работоспособность, здоровье и безопасность труда горнорабочих.

Научные основы горной теплофизики, на основе которых получены расчетные зависимости прогнозирования тепловых параметров воздуха в горных выработках, были сформированы в 50–70 годы прошлого столетия. Исследованием процессов формирования теплового режима и разработкой способов его регулирования на территории нашей страны занимались О.А. Кремнев, А.Н. Щербань, А.Ф. Воропаев, Ю.Д. Дядькин, Б.И. Медведев, Г.В. Дуганов, Ю.А. Цейтлин, В.П. Черняк и другие [2–8]. Среди зарубежных авторов широко известны работы M.J. McPherson, K.L. Gibson, J. Voss, S.J. Bluhm, L. Mackay.

Методы горной теплофизики базируются на обширном экспериментальном материале, полученном при изучении теплового режима на сотнях шахт и рудников по всему миру. В нашей стране методика проведения тепловых съемок в горных выработках и обработка результатов определена документом [9] и является общепринятой.

Экспериментальный анализ процессов тепловлагопереноса в шахтах указывает на то, что 70–80% всего тепла вентиляционной струи в горных выработках переносится в

Статья посвящается бывшему заведующему лаборатории МакНИИ к.т.н. А. К. Яковенко (1938–2014), который более 50 лет своей жизни отдал исследованиям теплового режима глубоких шахт Донбасса и экспериментальные данные, которых использованы авторами в данной статье.

скрытом виде за счет влагопереноса. Все методики прогнозирования температурных условий в глубоких шахтах [2, 3, 5, 8, 10] основаны на применении уравнения теплового баланса, который исследователи приводят к балансу по явным теплопритокам, идущим на повышение температуры рудничного воздуха. При этом влияние массопереноса учитывается эмпирическими зависимостями и коэффициентами в уравнениях теплового баланса. Сегодня прогностические возможности такого подхода исчерпаны, так как нельзя получить высокую точность расчетных зависимостей (по температуре воздуха менее  $0,8 \div 1^{\circ}\text{C}$ ), ибо тепловые балансы по явлому теплу составляют только 20–30% от общего баланса. В свою очередь, если строить прогнозные зависимости по балансам скрытого тепла, то существенным образом возрастает влияние случайных факторов влагообмена.

На основании большого числа экспериментальных исследований, выполненных в условиях глубоких шахт и рудников, установлено, что одним из основных факторов формирования теплового режима являются влагообменные процессы от горного массива к рудничному воздуху. Однако они отличаются выраженной случайностью и при аналитическом описании сложно поддаются учету, так как процессы влагообмена недостаточно исследованы. Поэтому на сегодняшний день для горных выработок отсутствуют математические модели, позволяющие на основе экспериментальных данных выполнять прогнозирование параметров микроклимата с учетом установленных характеристик и зависимостей влагообмена. Исходя из этого необходимо дальнейшее развитие методов тепловых расчетов, направленных на учет массообменных процессов и увеличение точности прогнозных зависимостей.

Целью статьи является сравнительный анализ аналитических и вероятностных моделей прогнозирования тепловлажностных условий в горных выработках для получения расчетных зависимостей, характеризующих процессы влагообмена между горным массивом и рудничным воздухом.

**Методы расчета теплопереноса в горных выработках.** В основу методик прогнозирования тепловых условий в горных выработках положено уравнение теплового баланса [2, 10]:

$$Gdi = g dy + \sum g_m dy \pm 9,816 \sin \alpha dy, \quad (1)$$

где  $g$ ,  $\sum g_m$  – удельные теплопоступления от горного массива и местных источников тепла, Вт/м;  $i$  – энталпия воздуха;  $G$  – весовой расход воздуха в горной выработке,  $\alpha$  – угол падения выработки,  $y$  – координата, направленная по длине выработки.

Во многих методиках для вычисления энталпии влажного воздуха применяют уравнение

$$i = c_p t + (r + 1,927 t)x, \quad (2)$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость сухого воздуха,  $c_p = 1,005 \text{ кДж}/\text{кг}^{\circ}\text{C}$ ;  $r$  – удельная теплота испарения воды,  $r = 2500 \text{ кДж}/\text{кг}$ ;  $t, x$  – соответственно температура и влагосодержание влажного воздуха.

В большинстве работ [2, 5, 10] в качестве эмпирической зависимости для учета влагообмена применяется линейный закон изменения относительной влажности по длине горной выработки:  $\varphi = \varphi_0 + (\Delta\varphi/L)y$ . С учетом этого после преобразований уравнения (1) и (2) линеаризуются и решаются аналитически.

В основу определения теплопритоков от горного массива положена теория нестационарного теплообмена [2, 5, 10], согласно которой удельный тепловой поток, поступающий в выработку, пропорционален коэффициенту нестационарного теплообмена ( $k_t$ ) и разности температур пород ( $t_p$ ) и воздуха ( $t$ ), (3):

$$g = k_t U(t_p - t) , \quad (3)$$

Таким образом, методики прогнозирования тепловых условий являются полуэмпирическими и основаны на уравнении теплового баланса, задании функций, характеризующих изменение влажностных параметров воздуха по длине горной выработки, и определении общего количества тепла от горного массива и других источников, поступающего в выработку. Аналогично построены и некоторые зарубежные методики, например [11].

Развитие вычислительной техники и методов математического моделирования позволяет применить новые подходы в описании процессов формирования тепловлажностных условий в горных выработках. При этом нет необходимости в аналитическом решении уравнения (1), вполне достаточно применить численные методы решения дифференциальных уравнений. Подлежат созданию также нейросетевые или вероятностные прогнозные модели.

**Экспериментальные закономерности.** При разработке различных видов тепловлажностных моделей используются следующие экспериментально подтвержденные закономерности, установленные отечественными и зарубежными исследователями.

1. Основная часть тепла, поступающая к вентиляционному воздуху в горных выработках, воспринимается в скрытом виде за счет испарения влаги. Доля скрытых тепловыделений для различных выработок составляет от 70÷80 до 90÷95% общего количества поступающего тепла [11–15].

2. Приращения энталпии ( $\Delta i$ ) и влагосодержания ( $\Delta x$ ) влажного воздуха в горных выработках имеют тесные корреляционные связи, характеризующиеся линейными регрессионными уравнениями вида:

$$\Delta i = a \Delta x + b; \quad \Delta x = a_1 \Delta i + b_1 , \quad (4)$$

где  $\Delta i, \Delta x$  – приращения энталпии и влагосодержания влажного воздуха на протяженном участке горной выработки;  $a, b, a_1, b_1$  – постоянные коэффициенты, зависящие от вида горной выработки и тепловлажностных параметров воздуха.

Обычно коэффициенты корреляции для уравнений (4) значимы, достаточно высоки и находятся в диапазонах 0,85÷0,97. В работе [14] для шахт Донбасса определены параметры уравнений (4): для воздухоподающих выработок  $a_1 = 0,270 \text{ кДж/кг}$ ,  $b_1 = 0,21 \text{ кДж/кг}$ ; для очистных выработок  $a_1 = 0,296$ ,  $b_1 = 0,16$ ; для вентиляционных выработок  $a_1 = 0,326$ ,  $b_1 = -0,04$ . В работах [12, 13, 15] для очистных выработок с охлаждением и без охлаждения воздуха рекомендованы соответственно следующие параметры уравнения (4):  $a_1 = 3,285$ ,  $b_1 = 2,223$  или  $a_1 = 0,252$ ,  $b_1 = 0,062$ .

3. Исследованиями экспериментально подтверждается факт зависимости массообменного числа Нуссельта от тепловлажностных и аэродинамических условий в горных выработках [13]:

$$Nu_D = A Re^m \rho^{-n} , \quad (5)$$

где  $Nu_D = \beta d/D$  – массообменное число Нуссельта;  $Re = \nu d/\nu$  – число Рейнольдса;  $\rho = \frac{P_s - P_n}{B}$  – массообменный параметр. Здесь  $\beta$  – коэффициент массоотдачи;  $\nu$ ,  $d$  – средняя скорость воздуха и эквивалентный диаметр  $d = 2R_0$  горной выработки;  $P_s, P_n$  – парциальное давление водяных паров на поверхности выработки и в воздушном потоке соответственно;  $B$  – атмосферное давление;  $D, \nu$  – коэффициенты молекулярной диффузии и кинетической вязкости воздуха.

Значения постоянной  $m$  для основных горных выработок равно 0,8, а для очистных выработок – 0,6. Значение постоянной  $n$  принимают равным 0,5, имеются также экспериментальные работы, где величина  $n$  обычно определена в диапазоне 0,22–0,53, в зависимости от вида горной выработки [13].

4. Важным показателем формирования процессов массообмена в горной выработке являются данные о значении парциального давления водяных паров на стенке выработки. В прогнозных моделях используют различные гипотезы о значении парциального давления водяных паров на стенке. Чаще всего принимают парциальное давление водяных паров на стенке равным давлению насыщенных паров при температуре стенки  $P_s = P_h(t_s)$ . Среднюю температуру поверхности в воздухоподающих и вентиляционных выработках обычно задают равной средней температуре воздуха по сухому термометру  $t_s = t$ . Среднюю температуру поверхности в лавах определяют в соответствии с уравнением  $t_s = -2,54 + 0,258 t_p + 0,807 t$  согласно [13].

Возможно, определение величины  $t_s$  согласно теории нестационарного теплообмена [5, 10] с учетом времени существования выработки.

**Аналитический метод расчета тепловлагопереноса в горных выработках.** Для прогноза тепловлажностного состояния воздуха в горной выработке используем уравнение массового баланса по водяному пару:

$$Vd\rho_n = \beta(\rho_h(t_s) - \rho_n)Udy, \quad (6)$$

где  $V = \nu S$  – объемный расход воздуха в выработке;  $U, S$  – периметр и сечение выработки;  $y$  – продольная координата (длина участка выработки  $dy$ );  $\rho_h(t_s), \rho_n$  – плотность насыщенного водяного пара при температуре поверхности выработки и плотность водяного пара в потоке воздуха.

Уравнение (6) и указанные выше закономерности позволили разработать следующую математическую модель формирования процессов тепломассообмена в горных выработках глубоких шахт. Основой модели является преобразованное к безразмерному виду уравнение массового баланса (6) вида:

$$\frac{d\Theta_n}{d\eta} = 2 \frac{Nu_D}{Sc Re} (\Theta_h(t_s) - \Theta_n); \quad \text{при } \eta = 0 \quad \Theta_n = 0, \quad (7)$$

где  $\eta = y/R_0$ ;  $d = 2R_0$ ;  $Sc$  – число Шмидта;  $\Theta_n = \rho_n - \rho_0$ ;  $\Theta_h(t_s) = \rho_h(t_s) - \rho_0$ ;  $\rho_0$  – плотность водяного пара в начале выработки.

Зависимость (7) дополним уравнениями (4) и (5), а также следующими термодинамическими соотношениями для влажного воздуха [10]:

$$i = 1,005t + (2500 + 1,927t)x; x = 0,622 \frac{P_n}{B - P_n};$$

$$P_n = \rho_n R_n(t + 273,0); \quad \varphi = P_n / P_h(t);$$

$$P_h(t) = 1,675 \cdot 10^{11} \exp\left(-\frac{5300}{273+t}\right);$$

где  $P_n, P_h(t)$  – парциальное давление водяного пара и насыщенного водяного пара в атмосферном воздухе при температуре  $t$ ;  $R_n = 461,43 \text{ кДж/кгК}$  – индивидуальная газовая постоянная водяного пара.

Приведенная модель является нелинейной гибридной системой, т.к. состоит из алгебро-дифференциальных уравнений и может быть решена численно. Для решения системы уравнений разработана имитационная модель с использованием объектно-ориентированной технологии, позволяющая применять для описания процессов стандартные блоки и функциональные схемы пакета прикладных программ *Matlab*. Модель реализована в среде визуального моделирования *Simulink* и настраивалась для конкретных глубоких шахт по имеющимся экспериментальным данным [12, 13, 15].

Шахты и выемочные участки выбирались из условия репрезентативного представления глубоких шахт Донбасса. С этой целью собирались имеющиеся экспериментальные данные, полученные различными организациями в разные годы при исследовании теплового режима основных 15 глубоких шахт. Для анализа было отобрано для последующей статистической обработки данных более 100 тепловых съемок на 40 выемочных участках. Результаты тепловых съемок были выполнены МакНИИ и ДонНТУ в 1980 – 2010 годах.

Указанные выемочные участки отличались отработкой пологих и наклонных пластов мощностью от 0,7 до 1,7 м на глубине от 600 до 1300 м по сплошной и столбовой системам разработки. Проветривание участков осуществлялось преимущественно по прямоточной и возвратноточной схемам проветривания. Управление горным давлением проводилось полным обрушением. Горные породы представлены сланцами, песчаниками и известняками. Температура горных пород в выборке наблюдений составляла 25–43°C, расход воздуха на проветривание участков был в пределах 400–1500 м<sup>3</sup>/мин. Длина участковых воздухоподающих и вентиляционных выработок составляла 300–1500 м, длина лав 140–240 м, а нагрузка на очистной забой от 300 до 1500 т/сут.

Собранный объем статистических данных позволил изучить закономерности формирования процессов тепломассообмена на выемочных участках и провести сравнительный анализ формирования тепловых режимов в различных условиях.

Численный анализ моделей показал, что для очистных выработок характер зависимости изменения влагосодержания от длины выработки обычно линейный, зависимость для энталпии имеет слабо выраженную нелинейность, зависимости температуры и относительной влажности имеют явно выраженную нелинейность.

После настройки модели выполнен комплекс прогнозных расчетов, который показал хорошую адекватность предложенного метода моделирования. Средняя погрешность определения температуры воздуха в лавах глубоких шахт составляет 0,4–0,6°C, влагосодержания 0,4–0,5 г/кг. Поэтому предложенная модель может быть использована при прогнозе климатических условий на выемочных участках.

**Вероятностный метод расчета тепловлагопереноса в горных выработках.**

Вероятностный расчет тепловлагопереноса основан на методах событийной оценки, которая позволяет представить состояния объектов в виде совместных событий наблюдения значений переменных состояния.

Такой подход предполагает применение знаний о закономерностях групповой динамики объектов, исходя из анализа совокупности показателей. Положительный эффект при этом может достигаться за счет одновременного учета как динамических закономерностей изменения состояний отдельных объектов, так и статистических закономерностей, характерных для поведения группы однородных объектов в целом [16].

Используемая методика событийной оценки основана на построении моделей коллективной динамики для однородных групп выработок (очистных, воздухоподающих, вентиляционных), исходя из гипотезы существования для таких объектов статистических распределений основных тепловлажностных параметров воздуха. Отличительной особенностью используемых методов является анализ не взаимосвязи входных и выходных параметров объектов, а анализ связи вероятностей событий наблюдения значений этих параметров в группе анализируемых объектов. В целом методика включает несколько этапов обработки и анализа данных о тепловлажностных параметрах воздуха в выработках.

а) Создается массив данных, характеризующих климатические условия в горных выработках. Структура массива имеет вид таблицы: строки таблицы – это названия конкретных горных выработок с их характеристиками; столбцы таблицы – это значения горнотехнических параметров (глубина ведения работ, длина лавы, температура пород, мощность пласта, расход воздуха и т.д.) и тепловлажностных параметров вентиляционного воздуха (температура, влажность, влагосодержание, энталпия воздуха на входе и выходе выработки). Массив данных охватывал 100 тепловых съемок на 40 выемочных участках глубоких шахт, характеристика которых была дана ранее.

б) На следующем этапе используется метод событийной оценки, который позволяет любое наблюдаемое изменение тепловлажностных параметров воздуха в горной выработке рассматривать как некое событие. Для этого выделяются простые события наблюдения значений отдельных параметров среди и совместные события одновременного наблюдения значений нескольких параметров. Данные события являются индикативными и наряду со значениями параметров характеризуют состояния изучаемых объектов. Вероятности событий наблюдения значений тепловлажностных параметров оценивались известными методами.

В статье использован метод непосредственного алгоритмического подсчета апостериорных вероятностей как простых, так и совместных событий на основе имеющихся статистических данных. Алгоритмы сортировки, группировки и непосредственного подсчета частот событий, а также скрипты определения апостериорных вероятностей этих событий представлены в работе [16]. Подобный подход дает возможность построить распределения различных событий и изучить связь вероятностей этих событий между собой.

в) Эмпирические распределения для событий определялись в виде функций регрессии следующим образом:

$$w = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\text{Pr}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt; \quad \text{Pr} = c_0 + s; \quad s = \sum_{k=1}^n c_k \ln p_k, \quad (8)$$

где  $w$  – статистическая (апостериорная) вероятность события наблюдения значений параметров, определенная алгоритмически;  $\Pr$  (пробит) – инверсная функция нормального распределения со средним, равным нулю, и дисперсией, равной единице;  $s$  – энтропия состояния;  $c_k$  – коэффициенты регрессии;  $p_k$  – параметры воздуха.

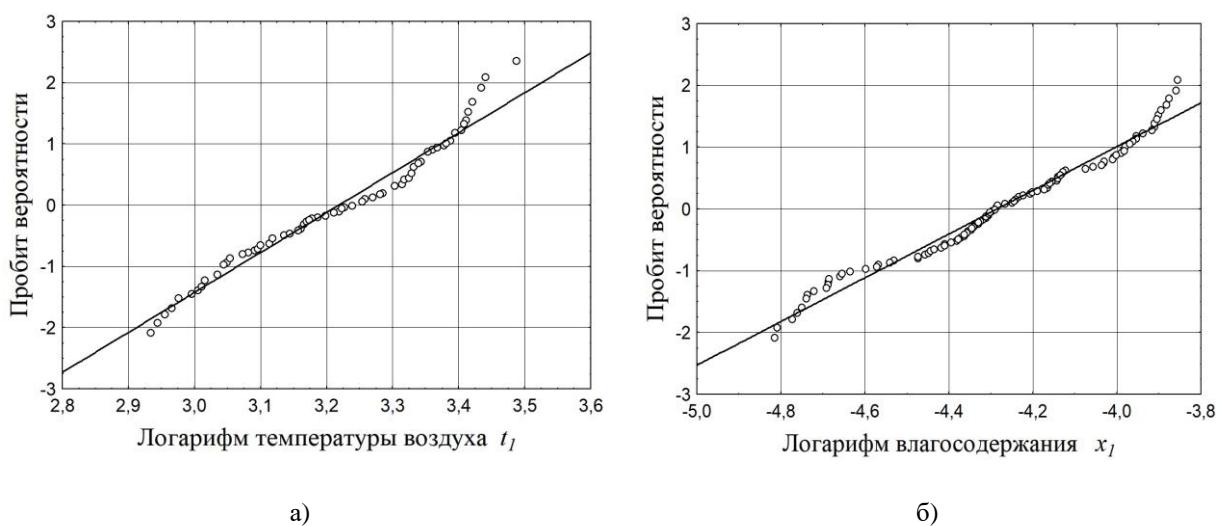
г) Прогнозирование тепловлажностных параметров воздуха проводится в следующей последовательности. Для группы объектов алгоритмически находятся вероятности состояний и определяются распределения температуры и влагосодержания на входе и выходе выработок. По известному значению температуры и влагосодержания на входе в конкретную выработку по полученным распределениям находятся вероятности простых событий. На основе установленных связей между вероятностями событий наблюдения параметров на входе и выходе выработки определяют значения вероятностей событий на выходе выработки. После этого по вероятностным распределениям параметров пересчитываются значения температуры и влагосодержания на выходе выработки.

**Вычислительные эксперименты и вероятностные оценки параметров тепловлагопереноса.** Статистическая обработка данных позволила получить распределения основных тепловлажностных параметров воздуха на входе и выходе очистных выработок. Соответствующие распределения с коэффициентами корреляции от 0,97 до 0,99 имеют вид (рис. 1):

$$\Pr_{t_1} = -20,985 + 6,521 \ln t_1; \quad \Pr_{x_1} = 15,178 + 3,541 \ln x_1;$$

$$\Pr_{t_2} = -24,707 + 7,352 \ln t_2; \quad \Pr_{x_2} = 17,247 + 4,264 \ln x_2,$$

где  $t_1, x_1$  – соответственно температура и влагосодержание на входе в лаву;  $t_2, x_2$  – температура и влагосодержание на выходе из лавы; пробиты  $\Pr$  – определены в соответствии с (8). Аналогичное распределение было установлено и для значений температуры пород в лавах.



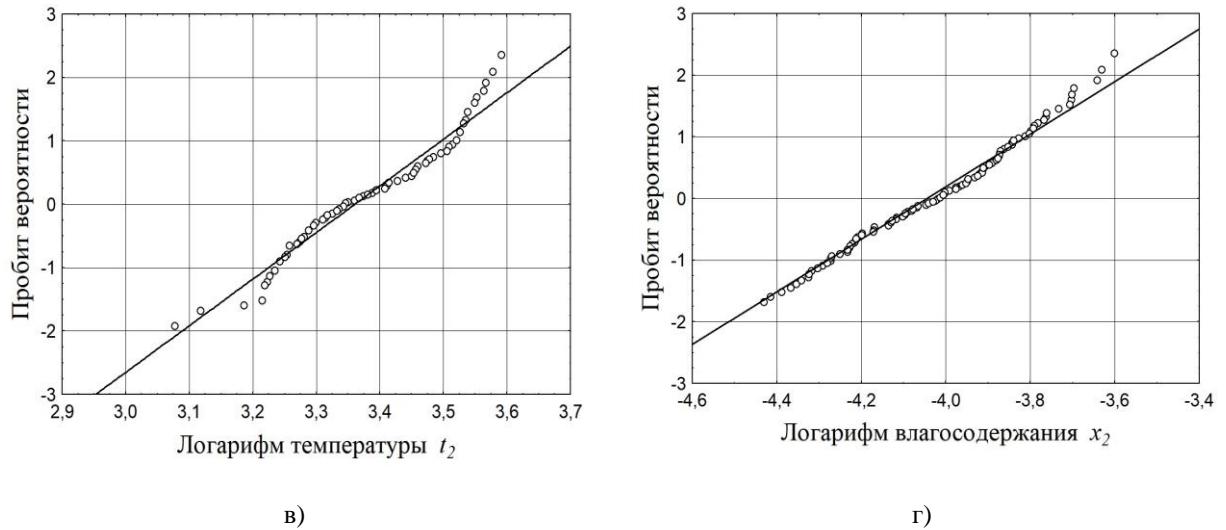


Рис. 1. Эмпирические распределения тепловлажностных параметров воздуха:  
а) температура воздуха на входе в лаву; б) влагосодержание воздуха на входе в лаву; в) температура воздуха на выходе из лавы;  
г) влагосодержание воздуха на выходе из лавы

Таким же образом были получены регрессионные зависимости, связывающие между собой вероятности простых событий наблюдения значений тепловлажностных параметров вентиляционного воздуха в лавах (рис. 2):

$$w_{t2} = -0,048 + 0,582 w_{t1} - 0,062 w_{x1} + 0,566 w_{tp}; \quad (9)$$

$$w_{x2} = -0,072 + 0,233 w_{t1} + 0,667 w_{x1} + 0,234 w_{tp}, \quad (10)$$

где  $w_{t2}, w_{x2}$  – вероятности событий наблюдения значений температуры и влагосодержания воздуха на выходе из лавы;  $w_{t1}, w_{x1}$  – соответствующие вероятности событий на входе в лаву;  $w_{tp}$  – вероятности событий наблюдения значений температуры пород. Коэффициенты корреляции уравнений (9–10) составляют 0,89–0,99.

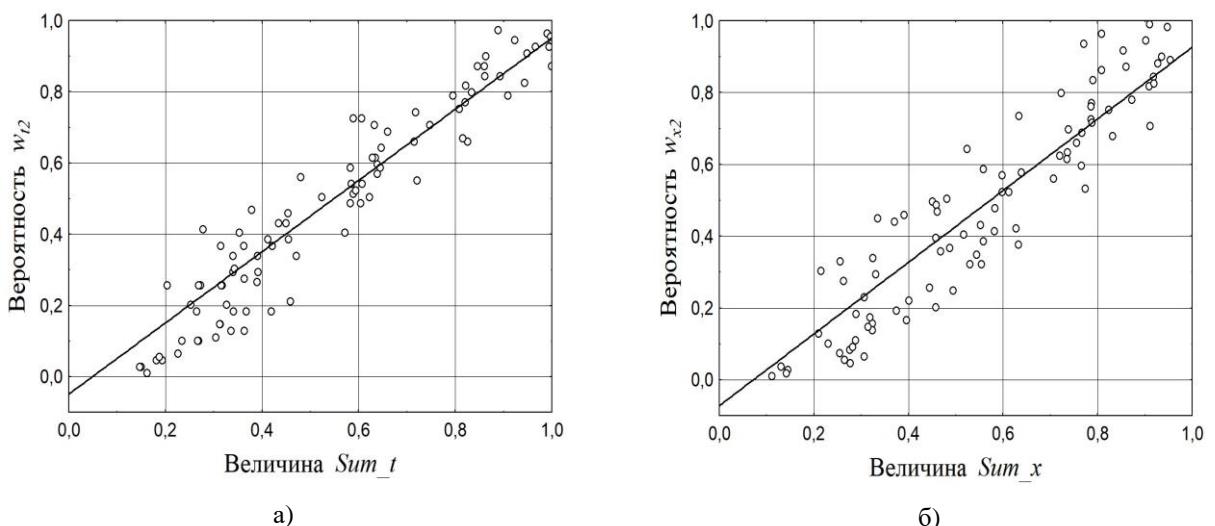


Рис. 2. Взаимосвязь вероятностей событий наблюдения тепловлажностных параметров воздуха на входе и выходе из лавы: а) по температуре воздуха; б) по влагосодержанию воздуха;  
 $Sum\_t = 0,582 w_{t1} - 0,062 w_{x1} + 0,566 w_{tp}; \quad Sum\_x = 0,233 w_{t1} + 0,667 w_{x1} + 0,234 w_{tp}$

Аналогичным образом определялись распределения и уравнения связи вероятностей для совместных событий одновременного наблюдения значений температуры и влагосодержания на входе и выходе из лавы. Это позволяет при расчетах получить дополнительное уравнение, связывающее между собой температуру и влагосодержание на выходе из лавы. Подобный подход дает возможность повысить точность расчета исходя из оценки состояний на входе и выходе выработки по совокупности параметров. Для данного метода средняя погрешность определения температуры воздуха на выемочных участках глубоких шахт составляет  $0,6\div0,8^{\circ}\text{C}$ , влагосодержания  $0,6\div0,7 \text{ г/кг}$ .

**Выводы.** Таким образом, анализ полученных вероятностных моделей для расчета тепловлагопереноса показал более низкую точность прогнозирования температуры и влагосодержания на выходе из лавы по сравнению с аналитическим методом расчета. Однако использование двух абсолютно независимых методов прогнозирования параметров воздуха в выработках дает возможность повысить достоверность выполняемых прогнозов. Кроме того, вероятностный метод расчета тепловлагопереноса позволяет оценивать взаимосвязь тепловлажностных параметров вентиляционного воздуха на выходе выработки исходя из получения уравнения состояния, что пока невозможно реализовать в других методах расчета. В заключение можно сделать вывод, что метод событийной оценки дает возможность вести прогнозные расчеты параметров среды, имеющих различные единицы измерения, так как использует вероятности совместных событий при одновременном наблюдении значений нескольких параметров.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 №505]. – Москва, 2020. – 523 с.
2. Щербань, А. Н. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт: В 2-х томах / А. Н. Щербань, О. А. Кремнёв. – К.: Изд-во АН УССР, 1960. – Т.1 – 430 с. – Т. 2 – 347 с.
3. Воропаев, А. Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах / А. Ф. Воропаев. – М.: Недра, 1966. – 219 с.
4. Дядькин, Ю. Д. Горная теплофизика (Регулирование теплового режима шахт и рудников) / Ю. Д. Дядькин, Ю. В. Шувалов, В. С. Тимофеевский. – Л.: Изд-во ЛГИ, 1976. – 96 с.
5. Венгеров, И. Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т.1. Анализ парадигмы / И. Р. Венгеров. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 632 с.
6. Брайчева, Н. А. Методы расчета температуры вентиляционного воздуха подземных сооружений/ Н. А. Брайчева, В. П. Черняк, А. Н. Щербань. – К.: Наукова думка, 1981. – 184 с.
7. Цейтлин, Ю. А. Проектирование и эксплуатация шахтных систем кондиционирования воздуха / Ю. А. Цейтлин, Т. Г. Абрамова, В. И. Могилевский [и др.]. – М.: Недра, 1983. – 261 с.
8. Черняк, В. П. Тепловые расчеты подземных сооружений / В. П. Черняк. – К.: Наукова думка, 1993. – 199 с.
9. Руководство по проведению тепловых съемок на угольных шахтах. – Макеевка: Изд. МакНИИ, 1982. – 68 с.
10. Единая методика прогнозирования температурных условий в угольных шахтах. – Макеевка-Донбасс: Изд. МакНИИ, 1979. – 196 с.
11. Voss J. Neue Forschungsergebnisse auf dem Gebiet "Grubenklima". – Gluckauf-Forschungshefte, 1981. – S. 241–249.
12. Яковенко А. К. Статистический анализ взаимосвязи тепломассообменных процессов в горных выработках / А. К. Яковенко, Г. В. Аверин // Физические процессы горного производства. Тепломассообмен в горных выработках и породных коллекторах: сб. науч.-тр. – 1985. – С. 68–72.

13. Бобров А. И. Теоретические основы диффузии тепла, импульса и примеси в горных выработках / А. И. Бобров, Г. В. Аверин. – Макеевка-Донбасс: Изд. МакНИИ, 1994. – 260 с.
14. Перепелица, В.Г. Научные основы создания нетрадиционного способа охлаждения воздуха и закладки выработанного пространства глубоких шахт: дисс. ... докт. техн. наук : 05.15.11 / В. Г. Перепелица. — Днепропетровск, 1999. — 357 с.
15. Аверин Г. В. Анализ закономерностей тепломассообмена на выемочных участках глубоких шахт / Г. В. Аверин, Р. А. Ктейшат, А. К. Яковенко // Вестник Донецкого национального университета. Серия А: Естественные науки. –2006. – №1. – С. 382–388.
16. Звягинцева А. В. Вероятностные методы комплексной оценки природно-антропогенных систем / А. В. Звягинцева / Под науч. ред. д.т.н., проф. Г. В. Аверина. – М.: Спектр, 2016. – 257 с.

*Поступила в редакцию 01.02.2023 г., рекомендована к печати 16.02.2023 г.*

## **ANALYTICAL AND PROBABILISTIC MODELS WHEN CALCULATING HEAT AND MOISTURE TRANSFER IN MINE WORKINGS**

**Averin G.V., Zviagintseva A.V., Samolikhin V.V.**

One of the main factors in the formation of the thermal regime in mining are moisture exchange processes. However, they differ in pronounced randomness and are difficult to describe in analytical models due to non-linearity. Therefore, it is important to further develop methods of thermal calculations aimed at accounting for mass transfer processes. A comparative analysis of analytical and probabilistic models for predicting heat and humidity conditions in mine workings has been carried out. The calculated dependences characterizing the processes of moisture exchange between the mountain massif and the mine air are obtained. It is shown that the use of two absolutely independent methods of forecasting air parameters in the workings makes it possible to increase the reliability of the forecasts performed.

**Keywords:** mining, heat and moisture transfer, analytical and probabilistic models, temperature and moisture content calculations, computational experiments.

**Аверин Геннадий Викторович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: averin.gennadiy@gmail.com

**Averin Gennadii Viktorovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Technologies of Donetsk National University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Звягинцева Анна Викторовна**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: a.zvyagintseva@donnu.ru

**Zviagintseva Anna Viktorovna**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at Department of Computer Technologies of Donetsk National University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Самолихин Всеволод Владимирович**

магистрант кафедры компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: blablabla.elka@mail.ru

**Samolikhin Vsevolod Vladimirovich**

Master student at Department of Computer Technologies of Donetsk National University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

## ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 662.9

### АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В НАСАДКАХ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ГОРЕЛОК

© 2023 Начкебия Н.С., Бирюков А.Б.

В результате анализа методов и математических моделей, применяемых для расчета теплообменных процессов в насадках регенеративных горелок, выделены общие черты и отличия. Для их развития предложен учет термической массивности тел, образующих насадку, и влияния параметров газового потока на локальные значения коэффициента теплоотдачи. Обоснована необходимость моделирования работы насадки в течение ряда последовательных циклов для определения времени выхода на стационарный режим.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, регенеративная горелка, теплообмен, регенеративная насадка, методика расчета.

Современные тенденции развития промышленности ориентированы на экологическую безопасность и рациональное потребление энергоресурсов. Эффективное использование энергоресурсов не только снижает себестоимость производства, но и зачастую может повысить качество производимой продукции и значительно увеличить экологическую безопасность предприятия. Одним из способов достижения энергосбережения является использование тепла отходящих газов.

Давно и широко используются теплообменники для утилизации тепла отходящих газов. В зависимости от температуры отходящих газов, их состава, особенностей технологических процессов и компоновки производственных агрегатов применяют теплообменники рекуперативного или регенеративного типа. Однако в последние десятилетие устойчиво набирают популярность использование рекуперативных и регенеративных горелок для утилизации тепла отходящих газов.

Рекуперативные и регенеративные горелки были разработаны с целью непосредственного использования тепла дымовых газов для подогрева воздуха горения. Рекуперативная насадка может обеспечить экономию около 30% энергии по сравнению с системой, использующей холодный воздух горения. Однако теплообменники рекуперативных горелок, как правило, неспособны обеспечить подогрев воздуха до температуры, превышающей 550–600°C. Они могут использоваться при рабочей температуре технологического процесса (700–1100 °C).

Регенеративные горелки могут использоваться в диапазоне рабочих температур 800–1500 °C. Такие горелки позволяют утилизировать 85–90% тепла отходящих газов печи, обеспечивая подогрев поступающего воздуха горения до очень высоких температур, которые могут достигать величины всего на 100–150°C меньше, чем рабочая температура печи [1].

Принцип работы регенератора цикличен. Регенеративный цикл состоит из двух периодов: нагрева и охлаждения насадки. Поэтому, как правило, регенеративные насадки применяются парно. В первом периоде цикла один из регенераторов разогревается продуктами сгорания, второй охлаждается воздухом, идущим на горение.

После «перекидки клапанов» происходит реверс газовых потоков, первый регенератор начинает охлаждаться, а второй нагревается отходящими газами. Как правило управление «перекидкой клапанов» осуществляется по заданной максимальной температуре уходящих газов 150 - 250 °С либо по заданному интервалу времени между перекидками (обычно 10 - 360 с) [2, 3]. Длительность самой перекидки составляет 1-5 с. На рисунке 1 показан принцип работы регенеративных горелок в печи.

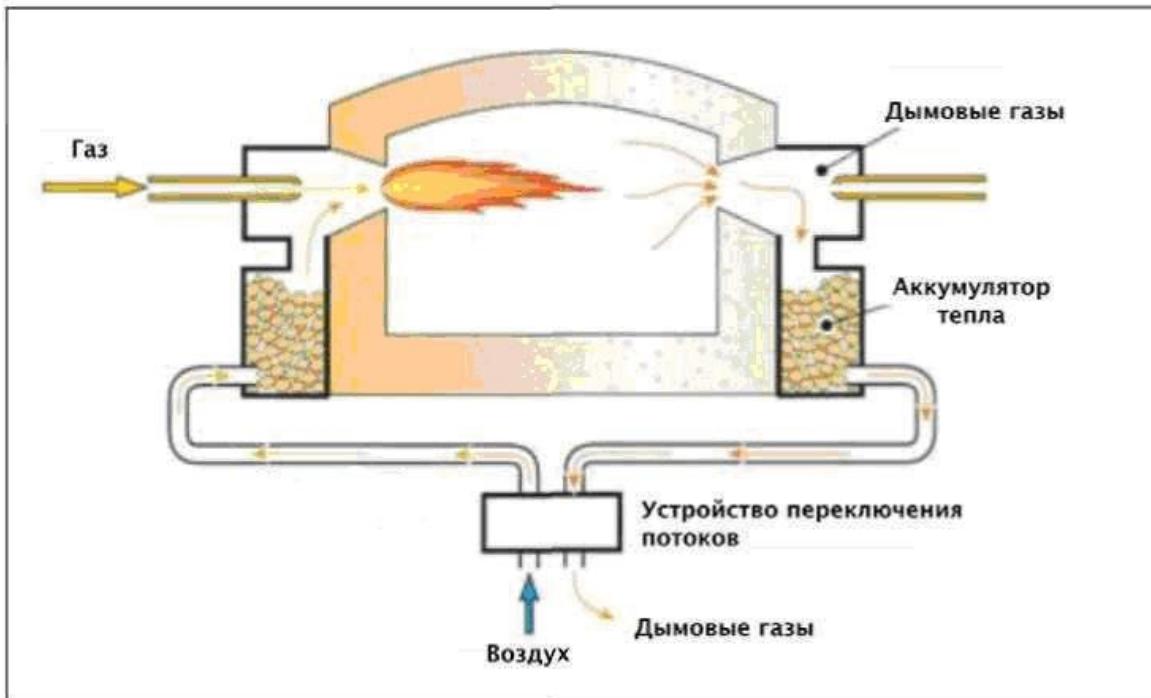


Рис.1. Принцип работы регенеративных горелок [3]

Регенеративные насадки характеризуются высокой тепловой эффективностью, из-за их развитой удельной поверхности нагрева в объеме насадки, 116 - 348 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup> для шаров диаметром 10 - 30 мм. Их КПД достигает 80 - 90 %, что позволяет максимально утилизировать теплоту высокотемпературных отходящих газов. Экономия топлива при использовании регенеративной системы отопления составляет 30 - 60 % [2, 3, 4]. Низкая температура уходящего дыма 150 - 250 °С позволяет отказаться от системы борцов и использовать для эвакуации дыма трубопроводы из низколегированной стали.

Важным ограничением для современных технологий регенеративных горелок является противоречие между требованиями энергоэффективности и сокращения выбросов. При сжигании в традиционном пламени результатом подогрева воздуха до значительных температур является высокая пиковая температура пламени, которая, в сочетании со значительным временем пребывания, приводит к существенному увеличению интенсивности образования NOx [4, 5, 6].

В последнее время набирает популярность рекуперативные и регенеративные горелки технологии HiTAC использующие технологию «беспламенного сжигания». Преимуществами этой технологии является значительно увеличенная зона горения, с относительно однородными температурными характеристиками и значительное снижение количества NOx, выбрасываемого в атмосферу (из-за отсутствия резкого пика температуры, характерного для традиционного пламени).

Также в последнее время становится более распространенным использование регенеративных горелок для сжигания низкокалорийных газов или смеси природного и низкокалорийного газа. Это дополнительно решает вопрос использования вторичных энергоресурсов таких как доменный газ, синтез газ и др. [7, 8].

Применение горелок такого типа сдерживается их высокой стоимостью и, соответственно, длительным сроком окупаемости. Лидерами производства рекуперативных и регенеративных горелок являются иностранные компании. В связи с современными реалиями geopolитической обстановки в мире важно освоить производство такого оборудования в отечественных условиях.

В современной мировой практике накоплен некоторый опыт по использованию регенеративных горелок. Однако общепризнанной методики для расчета таких горелок не существует.

Целью данной работы является анализ инженерных методов и математических моделей, применяемых для расчета процессов, протекающих в насадках регенеративных горелок.

Более полувека существует и успешно применяется метод расчета традиционных регенеративных теплообменников с насадкой в виде объемной решетки из огнеупорных кирпичей [9]. Данная методика во многом опирается на эмпирические коэффициенты, полученные экспериментальным путем и имеет ряд упрощений. Методика рассматривает все возможные компоновки кирпичей внутри насадки. Данная аналитическая методика достаточно проста в расчетах и доказала свою объективность, применяется для расчетов долгое время.

Адаптация методики [9] к задаче расчета шарикового микрорегенератора выполнена в работе [10]. Полученная в результате методика предназначена для установления требуемых размеров шариковых теплоаккумулирующих насадок регенеративных горелок для заданных средних температур дыма на входе и воздуха на выходе, тепловой мощности регенератора, а также диаметра шарика. Существенный недостаток как классической методики расчета регенераторов, так и адаптированного варианта — построение аналогии между двумя принципиально отличающимися процессами передачи теплоты: через разделительную стенку в рекуператоре и путем поочередного контакта удалаемых продуктов сгорания и нагреваемого воздуха с теплоаккумулирующей насадкой [11].

В работе [11] предложена методика определения основных конструктивных параметров теплообменных насадок регенеративных горелок. Эта методика базируется на уравнениях теплового баланса и теплопередачи при поочередном контакте охлаждаемой и нагреваемой сред с теплоаккумулирующей насадкой. При построении теплового баланса для одного цикла работы микрорегенератора теплоты полагают, что количество теплоты, отданное дымовыми газами теплоаккумулирующему материалу насадки во время газовой фазы цикла, равно повышению теплосодержания насадки и оно же равно количеству теплоты, воспринятому нагреваемым воздухом во время воздушной фазы. К недостаткам данной методики можно отнести, то что насадка рассматривается как термически тонкое тело, при расчете температура по толщине тел, образующих насадку, усредняется на каждом горизонте, также не учитывается разница температуры на поверхности и в центре теплоаккумулирующих агентов – шариков.

Разработана методика для оценки рациональности применения регенеративных горелок на производстве [12]. Принятие решения об использовании или не использовании регенеративных горелок в общем случае производится на основании рассмотрения технико-экономической задачи. Для ее корректного решения важно с

достаточной точностью определить эксплуатационные и капитальные затраты. Основной статьей эксплуатационных затрат являются затраты на топливо. Обычно оценка расхода топлива выполняется на основании значения коэффициента использования топлива (к.и.т.), определенного для значения температуры подогрева воздуха, указанного производителем горелок [12]. Однако в случае регенеративных горелок эта температура изменяется по ходу охлаждения каждой из теплоаккумулирующих насадок, а также имеется ряд других факторов, учет которых усложняет определение к.и.т. по стандартным формулам. В статье [12] предложен способ, позволяющий посчитать к.и.т. с учетом особенностей регенеративных горелок.

В работе [6] описан вариант расчета оценки эффективности работы регенеративной горелки. Методика предназначена в большей мере для приблизительной оценки получаемого эффекта от применения регенеративной или рекуперативной горелок.

В зарубежной практике есть ряд публикаций, в которых исследуются количества NOx и COв дымовых газах, при применении регенеративных горелок, а также влияние увеличения и уменьшения количества подаваемого воздуха и доли низкокалорийного газ на беспламенное сжигание [4, 7, 13]. Такие исследования проводились еще в СССР. И есть достаточное количество публикаций на эту тему в русскоязычных источниках.

Для более детального изучения особенностей тепловой работы регенеративных горелок используется математическое моделирование.

Численные методы позволяют решать широкий спектр задач с учетом переменных теплофизических свойств и условий теплообмена. При выборе рациональных параметров расчетной сетки (шага по времени и координатам) обеспечивается высокая точность вычислений.

В работе [14] на основе анализа литературных данных была разработано математическое описание тепловых процессов в насадке регенеративной горелки. В описании тепловых процессов учитываются все этапы теплопередачи (от газа к насадке и теплопроводность внутри насадки). В данном исследовании детально проработан вопрос задания граничных условий. Однако из статьи не ясно будет ли учитываться влияние температуры на коэффициент теплопроводности, что в некоторых случаях может вносить существенные погрешности. Из-за незавершенности проекта не освещен вопрос о соответствии полученных данных экспериментальным данным из промышленной практики.

В статье [15] рассматривается вопрос о построении и исследовании простейшей математической модели процесса аккумуляции и регенерации тепловой энергии в регенеративном теплообменнике. Проведено количественное и качественное исследование температурного режима в процессе аккумуляции и регенерации тепла. Данную модель автор называет простейшей, так как представлена не дифференциальным уравнением в частных производных, а линейным обыкновенным дифференциальным уравнением; рассматриваемое линейное обыкновенное дифференциальное уравнение решается в явном виде и, вследствие этого, сформулированные задачи удается решить сравнительно простыми математическими методами, что не позволяет учесть ряд важных факторов. Также в работе автор рассчитывает коэффициенты энергоэффективности. Под коэффициентами энергоэффективности понимается отношение полученной (отданной) насадкой тепловой энергии к общей тепловой энергии, проходящей через насадку за один этап аккумуляции(регенерации). Эти два коэффициента принимаются постоянными на всех

этапах аккумуляции и регенерации, что удобно с расчетной точки зрения, однако требует дополнительного подтверждения.

Целью статьи [16] заявлена разработка математической модели процесса аккумуляции тепловой энергии в виде смешанной задачи, состоящей из системы двух дифференциальных уравнений. Приведено доказательство существования единственного решения смешанной задачи и определено приближенное решение смешанной задачи. Необходимо отметить, что в представленной модели коэффициент теплоотдачи воздуха  $\alpha$  считается известной величиной. Но в реальности величина  $\alpha$  существенно зависит от параметров потока воздуха и особенностей самого процесса нагрева, поэтому было бы правильно считать величину  $\alpha$  определяемой. В этом случае математическую модель нужно скорректировать, необходимо ввести дополнительное условие, позволяющее находить  $\alpha$ .

В статье [17] представлена математическая модель, позволяющая учитывать изменение действительной скорости теплоносителя по высоте слоя. Получены конечно-разностные уравнения для процесса нагрева неподвижного слоя материалов с учетом тепловых потерь через обечайку корпуса насадки. Исследовано влияние усреднения по тепловому потоку для разных условий расчета тепловых потоков на результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными.

По результатам исследования можно сделать вывод что постоянная или изменяющаяся толщина элементарного слоя не имеет значительного влияния на результат расчета, в сравнении с экспериментальными данными, значимым является усреднение теплового потока и необходимость учесть потери в окружающую среду. Также из работы не ясно, когда же происходит выход на стационарный режим работы насадки, и прекращается ли по их модели прирост температуры.

В статье [18] описана математическая модель регенеративного теплоутилизатора: получены зависимости для нахождения коэффициента теплоотдачи, дифференциальные уравнения для расчета процессов тепломассопереноса, что встречается и в других работах. Представлено описание программного модуля для решения уравнений и получения коэффициентов регенерации и аккумуляции. Недостатком работы можно считать большой ряд допущений отличных от действительности:

- регенератор теплоизолирован, поэтому потери тепла из насадки в окружающую среду отсутствуют;
- теплообмен в насадке происходит без конденсации паров влажного воздуха;
- теплофизические свойства материала насадки регенератора и воздуха постоянны;
- время прохождения воздуха через регенератор намного меньше, чем время цикла.

**Выводы.** Тема применения регенеративных горелок в промышленности актуальна во всем мире и является одним из передовых инструментов достижения энергоэффективности. Активно ведутся исследования регенеративных горелок как в тепловом спектре, так и в экологическом. Накоплен определенный опыт в области расчетов и математического моделирования тепловых процессов, происходящих в регенеративной насадке. Имеются примеры успешного моделирования, результаты, полученные при моделировании, в достаточной мере соответствуют данным, получаемым при эксплуатации регенеративных горелок. Неотъемлемой чертой современных моделей должен быть учет термической массивности тел, образующих насадку, и обеспечение возможности расчетного учета особенностей газового потока на

определение локальных значений коэффициента теплоотдачи. Также для повышения практической значимости результатов необходимо предусмотреть последовательно моделирование работы насадки в течение ряда циклов вплоть до выхода на полностью циклически повторяющиеся температурные кривые.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тимошпольский, В. И. Пути повышения энергоэффективности промышленных печей при рекуперации теплоты уходящих дымовых газов / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, Д. В. Менделев // Литье и металлургия. – 2012. – № 2(65). – С. 98-101.
2. Регенеративные системы отопления для нагревательных печей прокатного и кузнецкого производств / И. М. Дистергефт, Г. М. Дружинин, В. И. Щербинин [и др.] // Металлургическая теплотехника: Сб. науч. тр. НМетАУ. – Днепропетровск, 2002. – С. 44 – 57.
3. Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://itland.com.ua/solutions/network-security/intrusion-detection-prevention-systems> (дата обращения: 07.06.2022). – Текст: электронный.
4. Tenova flexytech regenerative flameless burners / Marco Ageno, Alessandro Della Rocca, MassimilianoFantuzzi, Maurizio Senarega // Millennium Steel. – 2011. – С. 115-122.
5. Eco-friendly regenerative burner heating system technology application and its future prospects / S. Fukushima, Y. Suzukawa [et al.] // NKK Technical Review – 2002. – V. 87. – P. 30-37.
6. Joachim G. Wuenning Regenerative Burners for Heat Treating Furnaces / Joachim G. Wuenning // 8th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers (25 - 28 March 2008 Vilamoura, Portugal). – 11 p.
7. Yepes, H. A. The effect of syngas addition on flameless natural gas combustion in a regenerative furnace / H. A. Yepes, J. E. Obando, A. A. Amell // Energy. – 2022. – V. 252. – P. 124008.
8. Mörtsberg, M. Combustion of Low Calorific Fuels in High Temperature Oxygen Deficient Environment / M. Mörtsberg, W. Blasiak, A. K. Gupta // Industrial Heating Journal. – 2005. – V. 42. – № 1. – P. 45-54.
9. Расчеты нагревательных печей / С. И. Аверин, Э. М. Гольдфарб, А. Ф. Кравцов [и др.] / под ред. Н. Ю. Тайца. — Киев: Техника, 1969. – 539с.
10. Методика теплового расчета шариковой регенеративной насадки / Ю. Л. Курбатов, А. Б. Бирюков, Н. С. Начкебия [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018. – Т. 1. – № 6. – С. 82-90.
11. Бирюков, А. Б. Методика определения основных параметров теплообменной насадки регенеративных горелок // Сталь – 2018. – № 11. – С. 72-75.
12. Бирюков, А. Б. Анализ теплотехнической эффективности печей, отапливаемых регенеративными горелками / А. Б. Бирюков, А. Н. Лебедев, П. А. Гнитиев // Сталь. – 2018. – № 3. – С. 64-67.
13. Parametric Study of a Regenerative Burner Working in a Flameless Combustion / A. Verissimo, A. Rocha, A. Maura [et al.] // January 2015 Conference: IX CongressoNacional de EngenhariaMecânica. – DOI 10.20906/CPS/CON-2016-1163.
14. Кабаков, З. К. Математическое описание тепловых процессов в насадке регенеративной горелки / З. К. Кабаков, И. А. Сенатова // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии I Международная научно-техническая конференция. – 2013. – С. 119-123.
15. Монаркин, Н. Н. Построение и исследование простейшей математической модели регенеративного теплообменника / Н. Н. Монаркин, А. А. Синицын, А. Н. Наимов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2016. – № 3(72). – С. 11-15.
16. Математическая модель процесса аккумуляции тепловой энергии в стационарном переключающемся регенеративном теплоутилизаторе / Н. Н. Монаркин, А. Н. Наимов, А. А. Синицын, Т. В. Рогулина // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-4. – С. 759-764.
17. Сысоева, Т. Е. Конечно-разностное решение задачи нагрева (охлаждения) неподвижного пористого слоя материала на основе уточненной физической модели движения газа / Т. Е. Сысоева, Ю. Я. Абраменков // Металлургическая теплотехника: Сб. науч. тр. НМетАУ. – Днепропетровск, 2008. – С. 272-286.
18. Соболь Е. В. Математическая модель регенеративного теплоутилизатора / Е. В. Соболь // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование». – 2010. – № 2. – С. 34-44.

Поступила в редакцию 12.01.2023 г., рекомендована к печати 25.01.2023 г.

**ANALYSIS OF CALCULATION METHODS AND MATHEMATICAL MODELS OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN THE NOZZLES OF REGENERATIVE BURNERS**

**Nachkebiia N.S., Biriukov A.B.**

As a result of methods and mathematical models for calculation the heat exchange processes in the nozzle of regenerative burners analytics common features and differences were found. For their development it is proposed to take into account the thermal massiveness of the bodies forming the packing and the influence of the gas flow parameters on the local values of the heat transfer coefficient. The necessity of modeling the operation of the packing for a number of successive cycles to determine the time for reaching the stationary regime is substantiated.

**Keywords:** energy efficiency, regenerative burner, heat exchange, regenerative nozzle, calculation method.

**Начкебия Наталья Сергеевна**

аспирант ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,  
Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: nataliya.nachkebiya@gmail.com

**Nachkebiia Natalia Sergeevna**

Postgraduate student of the Donetsk National Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

**Бирюков Алексей Борисович**

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

**Biriukov Aleksei Borisovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Thermophysics, Vice-rector of Donetsk National Technical University,  
Russian Federation, DPR, Donetsk.

УДК 662.9

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ШАГА УКЛАДКИ ЗАГОТОВОВОК В ПЕЧИ С МЕХАНИЗИРОВАННЫМ ПОДОМ, РАБОТАЮЩЕЙ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

© 2023 Бирюков А.Б., Турулина Ю.О.

---

При работе проходных печей с механизированным подом в условиях переменной производительности важной задачей является определение рациональных режимных параметров. Для ряда параметров может ставиться вопрос о нахождении оптимальных параметров. Предлагается способ определения оптимального шага укладки заготовок, при котором достигается минимальный удельный расход топлива. При этом температурный профиль печи определяется из условия сохранения энталпии металла по зонам и печи в целом при различной укладке на уровне номинального режима.

**Ключевые слова:** проходная печь, режимные параметры, оптимальный шаг укладки заготовок, переменная производительность, температурный профиль, энталпия металла.

---

**Введение.** Для обработки металла давлением особое значение имеет качество его нагрева. Необходимо обеспечить требуемую пластичность, не допустить перегрев, чрезмерную скорость и несимметричность нагрева, приводящие к ухудшению структуры металла, образованию трещин и разрывов, а также минимизировать потери, связанные с образованием окалины.

Известно множество работ, направленных на сокращение расхода топлива в проходных печах, а также утилизацию теряемой теплоты [1-3]. Важнейшее значение для повышения уровня энергоэффективности технологии нагрева металла в проходных печах имеет определение рациональных режимных параметров [4].

Вопросу совершенствования методики определения рациональных режимных параметров за счет обеспечения возможности однозначного установления значения температуры уходящих газов посвящена работа [5]. Этот способ базируется на методе последовательных приближений и позволяет также однозначно определить температуру поверхности заготовки и среднемассовую температуру в конце методической зоны.

В работе [6] предложено существенное усовершенствование базовой расчетной методики для методических печей. Оно заключается в определении температурного профиля печи, при котором будет гарантировано получено заданное теплосодержание металла в конце каждой зоны печи при ее работе в условиях пониженной производительности.

Ранее было рассмотрено расширение диапазона регулирования режимных параметров проходной печи с механизированным подом, работающей в условиях переменной производительности, за счет изменения шага укладки заготовок [7]. Однако вопрос определения оптимального значения шага укладки заготовок, при котором обеспечивается минимальный удельный расход теплоты (а значит и топлива) на нагрев металла, в этой работе не был рассмотрен.

Таким образом, целью настоящей работы является создание методики для определения оптимального шага укладки заготовок в печи с механизированным подом, при котором достигается минимальный удельный расход теплоты при условии обеспечения заданного теплосодержания металла в конце нагрева.

**Методика определения оптимального шага укладки заготовок и температурного профиля печи.** Предлагается методика определения оптимального шага укладки заготовок для проходной печи, работающей в условиях переменной производительности, основанная на методе [4], предполагающем однозначное вычисление шага укладки заготовок и уточнение температурного профиля печи, при котором гарантировано заданное теплосодержание металла в конце нагрева.

Сущность предложенной методики заключается в следующем.

С помощью метода [4] определяются параметры опорного (начального для оптимизации) режима с заданной производительностью печи и предварительно выбранным шагом укладки заготовок.

Для заданной производительности рассматриваем задачу обеспечения определенного для опорного режима теплосодержания металла при работе с разными шагами укладки заготовок. То есть, по сути реализуется метод прострела: весь возможный диапазон изменения шага укладки заменяется рядом дискретных значений (например, с шагом 10 мм). Для каждого шага укладки определяется температурный профиль печи и удельный расход теплоты. После идентификации диапазона шагов укладки, на котором идентифицируется искомый экстремум, целесообразно разбить этот диапазон на ряд участков, например с шагом 1 мм и, таким образом, с практической точностью идентифицировать величину оптимального шага укладки заготовок.

Ниже детальнее представлен вычислительный алгоритм определения температурного профиля печи и удельного расхода теплоты для каждого рассматриваемого значения шага укладки заготовок.

Путем интерполяции табличных данных [8] определяются коэффициенты несимметричности нагрева и задается температура газа в сварочной зоне печи.

Скорость движения заготовок определяется по формуле:

$$v = \frac{P \cdot 1000 \cdot (d + a)}{d^2 \cdot l_3 \cdot \rho \cdot 3600},$$

где:  $v$  – скорость движения заготовок, м/с;  $P$  – производительность печи, т/ч;  $d$  – толщина заготовки, м;  $a$  – шаг укладки заготовок, м;  $l_3$  – длина заготовок, м;  $\rho$  – плотность материала заготовки, кг/м<sup>3</sup>.

Затем вычисляется общее время и время нагрева металла по зонам:

$$\tau_i = \frac{L_i}{3600 \cdot v},$$

где:  $\tau_i$  – общее время или время нагрева заготовки в соответствующей зоне печи, ч;  $L_i$  – общая длина или длина соответствующей зоны печи, м;  $v$  – скорость нагрева заготовки, м/с.

В соответствии с методикой [4] определяются значения температуры уходящих газов, поверхности заготовки и среднемассовую температуру в конце методической зоны. По формуле Семикина вычисляется энталпия металла по зонам и в конце нагрева:

$$i_i = \frac{K_1 \cdot \overline{q_i} \cdot 3600 \cdot \tau_i}{\mu \cdot d \cdot \rho \cdot 10^3} + i_{i-1},$$

где:  $i_i$  – среднемассовая энталпия заготовки на выходе из печи или в конце соответствующей зоны, кДж/кг;  $K_1$  – коэффициент материальной нагрузки;  $\bar{q}_i$  – средняя плотность теплового потока в соответствующей зоне печи, Вт/м<sup>2</sup>;  $\tau_i$  – время нагрева заготовки в печи или в соответствующей зоне, ч;  $\mu$  – коэффициент несимметричности нагрева;  $i_{i-1}$  – среднемассовая энталпия заготовки в начале соответствующей зоны печи или начальная энталпия заготовки, кДж/кг.

Затем полученные значения энталпии металла сравниваются с величиной, соответствующей опорному режиму. В случае несовпадения величин необходимо задаться другим значением температуры газов в сварочной зоне печи и повторить расчет заново. Иллюстрация применения разработанной методики проведена для трехзонной методической печи с шагающими балками длиной 27 м для производительностей по металлу 110 и 80 т/ч. Нагрев осуществлялся для квадратной заготовки шириной 0,15 м и длиной 6 м. В качестве опорных были приняты следующие режимы нагрева: при производительности  $P = 110$  т/ч с температурой газов в сварочной зоне 1400 °С и шагом укладки заготовок  $a=100$  мм, а при производительности  $P = 80$  т/ч – 1400 °С и  $a=250$  мм, соответственно.

Вычисления были проведены для шагов укладки от  $a=100$  мм до  $a=0$  мм при производительности  $P = 110$  т/ч с интервалом 5 мм и от  $a=250$  мм до  $a=0$  мм при производительности  $P = 80$  т/ч с интервалом 10 мм. После предварительных расчетов для двух вариантов производительности был идентифицирован одинаковый диапазон, локализующий оптимум (от  $a=40$  мм до  $a=35$  мм) и далее он был «проксирован» с шагом 1 мм.

Зависимость температуры газов в сварочной зоне печи и температуры уходящих газов, а также удельного расхода тепла от шага укладки заготовок представлены на рис. 1, рис. 2 и рис. 3, соответственно. Основные результаты расчетов представлены в таблице 1.

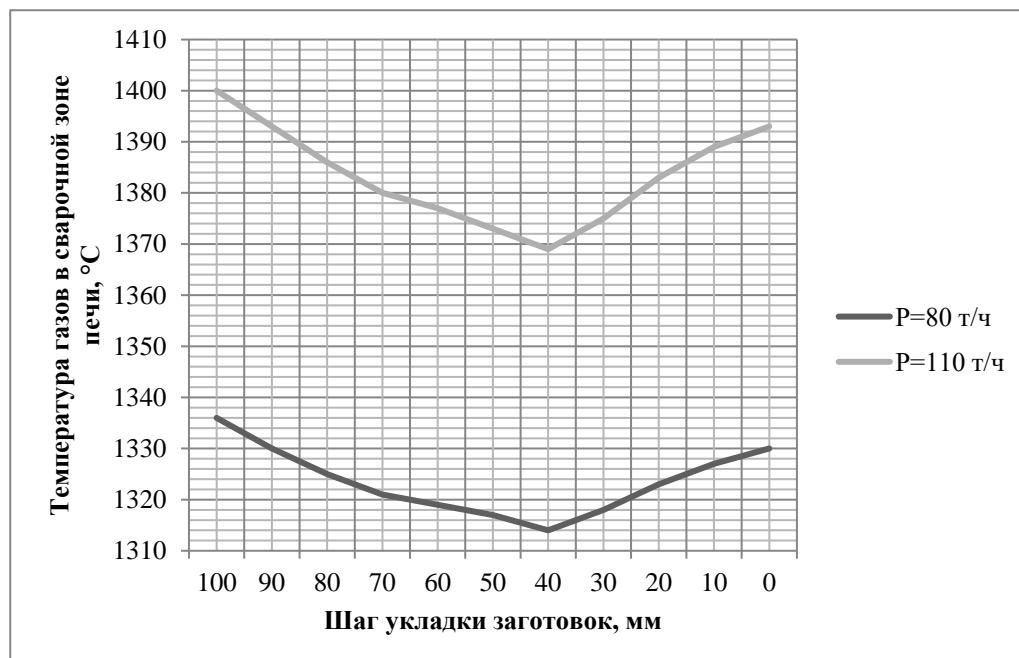


Рис. 1. Зависимость температуры газов в сварочной зоне печи от шага укладки заготовок при производительности  $P=110$  т/ч и  $P=80$  т/ч

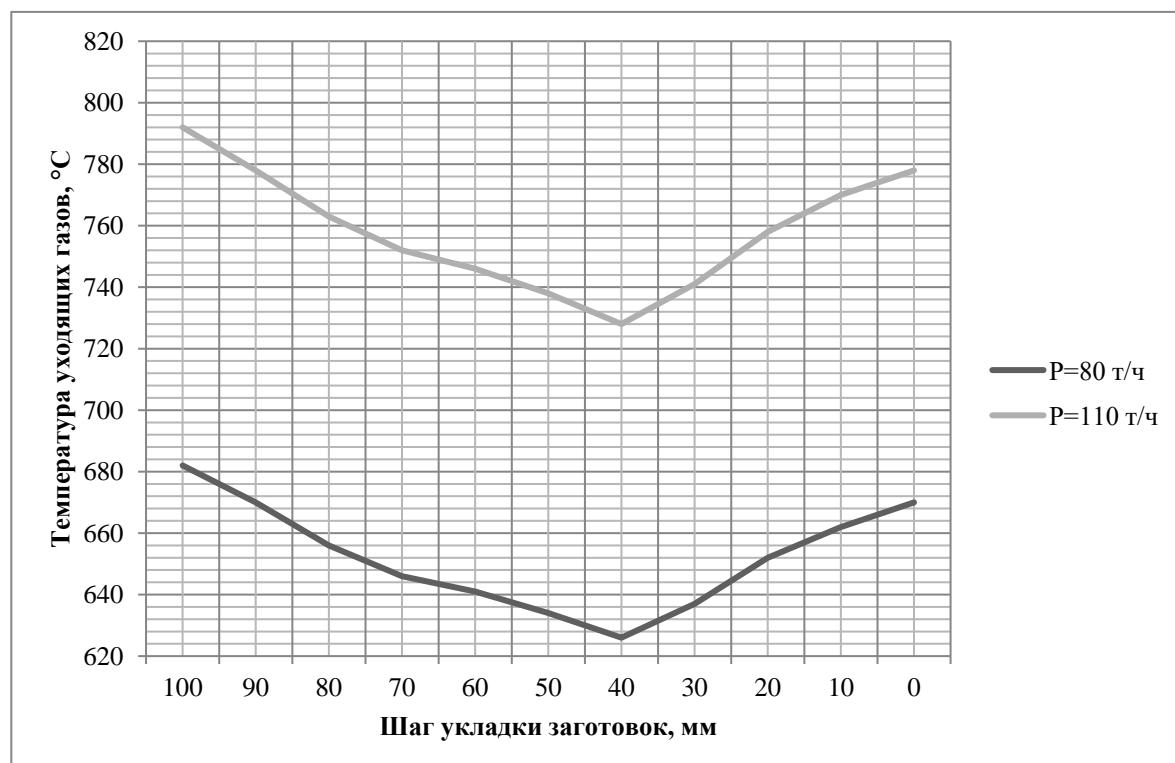


Рис. 2. Зависимость температуры уходящих газов от шага укладки заготовок при производительности  $P=110$  т/ч и  $P=80$  т/ч

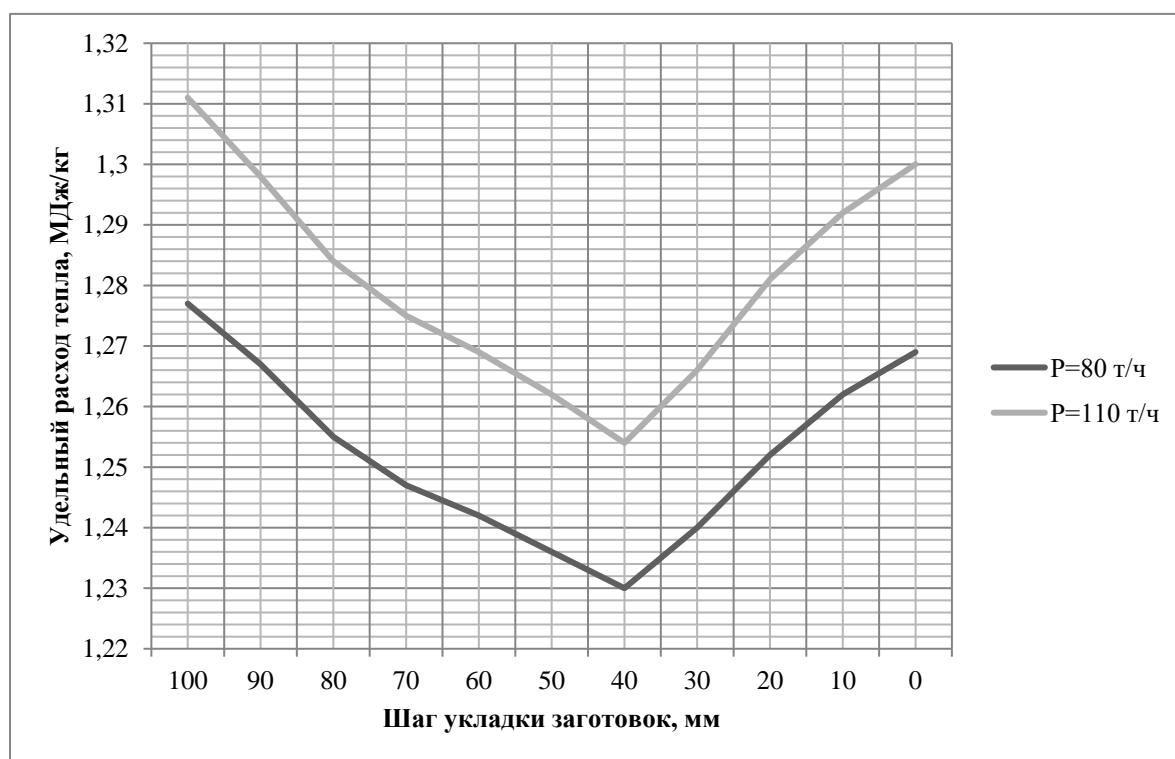


Рис. 3. Зависимость удельного расхода тепла от шага укладки заготовок при производительности  $P=110$  т/ч и  $P=80$  т/ч

Таблица 1. Результаты расчетов режимных параметров трехзонной методической печи с механизированным подом с различным шагом укладки заготовок

	Ном. режим	50 мм	40 мм	39 мм	38 мм	37 мм	36 мм	35 мм	30 мм
Продолжительность нагрева заготовки при $P=110 \text{ т/ч}$ $t, \text{ ч}$	1,04	1,301	1,369	1,376	1,384	1,391	1,398	1,406	1,445
Продолжительность нагрева заготовки при $P=80 \text{ т/ч}$ $t, \text{ ч}$	0,894	1,788	1,882	1,892	1,902	1,913	1,923	1,933	1,987
Коэффициент несимметричности при одностороннем нагреве при $P=110 \text{ т/ч}$ $\mu_k$	0,507	0,58	0,604	0,606	0,609	0,615	0,626	0,636	0,688
Коэффициент несимметричности при одностороннем нагреве при $P=80 \text{ т/ч}$ $\mu_k$	0,413	0,58	0,604	0,606	0,609	0,615	0,626	0,636	0,688
Коэффициент несимметричности при двустороннем нагреве при $P=110 \text{ т/ч}$ $\mu_1$	0,353	0,387	0,397	0,398	0,399	0,402	0,406	0,41	0,43
Коэффициент несимметричности при двустороннем нагреве при $P=80 \text{ т/ч}$ $\mu_1$	0,313	0,387	0,397	0,398	0,399	0,402	0,406	0,41	0,43
Температура газов в сварочной зоне при $P=110 \text{ т/ч}$ $t_{cb}, ^\circ\text{C}$	1400	1373	1369	1368	1368	1368	1369	1370	1375
Температура газов в сварочной зоне при $P=80 \text{ т/ч}$ $t_{cb}, ^\circ\text{C}$	1400	1317	1314	1314	1313	1313	1314	1315	1318
Температура уходящих газов при $P=110 \text{ т/ч}$ $t_{yx}, ^\circ\text{C}$	792	738	728	727	726	727	729	731	741
Температура уходящих газов при $P=80 \text{ т/ч}$ $t_{yx}, ^\circ\text{C}$	826	634	626	625	624	625	626	628	637
Температура поверхности металла на выходе из методической зоны при $P=110 \text{ т/ч}$ $t_{пов}, ^\circ\text{C}$	803	806	810	810	810	811	813	815	825
Температура поверхности металла на выходе из методической зоны при $P=80 \text{ т/ч}$ $t_{пов}, ^\circ\text{C}$	802	805	807	807	809	810	810	811	820
Среднемассовая температура заготовки на выходе из методической зоны при $P=110 \text{ т/ч}$ $t_{ср.мас}, ^\circ\text{C}$	658	658	659	659	659	659	659	659	659

Среднемассовая температура заготовки на выходе из методической зоны при $P=80$ т/ч $t_{ср.мас}$ , °C	673	678	678	678	679	679	678	678	678
Энталпия металла после методической зоны при $P=110$ т/ч $i_1$ , кДж/кг	402	402	402	402	402	402	402	402	402
Энталпия металла после методической зоны при $P=80$ т/ч $i_1$ , кДж/кг	413	417	417	417	418	418	417	417	417
Энталпия металла на выходе из сварочной зоны при $P=110$ т/ч $i_2$ , кДж/кг	767	768	768	768	768	768	768	768	768
Энталпия металла на выходе из сварочной зоны при $P=80$ т/ч $i_2$ , кДж/кг	768	772	773	773	773	773	773	773	772
Энталпия металла в конце нагрева при $P=110$ т/ч $i_k$ , кДж/кг	812	812	812	812	812	812	812	812	812
Энталпия металла в конце нагрева при $P=80$ т/ч $i_k$ , кДж/кг	812	812	812	812	812	812	812	812	812
Расход топлива при $P=110$ т/ч $B$ , м <sup>3</sup> /с	1,155	1,112	1,105	1,104	1,104	1,104	1,106	1,107	1,115
Расход топлива при $P=80$ т/ч $B$ , м <sup>3</sup> /с	0,911	0,792	0,788	0,788	0,787	0,788	0,788	0,789	0,794
Удельный расход тепла при $P=110$ т/ч $b_{уд}$ , МДж/кг	1,311	1,262	1,254	1,253	1,253	1,253	1,255	1,257	1,266
Удельный расход тепла при $P=80$ т/ч $b_{уд}$ , МДж/кг	1,422	1,236	1,23	1,229	1,229	1,229	1,23	1,232	1,24
Условный расход топлива при $P=110$ т/ч $b_{усл}$ , кг у.т/т	44,752	43,071	42,805	42,775	42,751	42,769	42,829	42,891	43,194
Условный расход топлива при $P=80$ т/ч $b_{усл}$ , кг у.т/т	48,541	42,199	41,973	41,947	41,928	41,947	41,994	42,047	42,312

Результаты расчетов показали, что для производительностей  $P=110$  т/ч и  $P=80$  т/ч оптимальный шаг укладки заготовок составляет  $a=38$  мм. При этом температура газов в сварочной зоне составляет 1368 °C для печи с производительностью  $P=110$  т/ч и 1313 °C – для  $P=80$  т/ч, а температура уходящих газов – 726 °C и 624 °C, соответственно. Естественно, что этот результат соответствует исключительно всему набору принятых исходных данных, а главное использованной эмпирической аппроксимации зависимости коэффициента несимметричности нагрева от шага укладки заготовок [8].

Переход на оптимальный шаг укладки заготовок по сравнению с опорным режимом позволяет сэкономить расход теплоты (и соответственно топлива) на 5% при производительности  $P=110$  т/ч и на 15% – при производительности  $P=80$  т/ч.

**Выводы.** Предложена методика определения оптимального шага укладки заготовок, позволяющая минимизировать удельный расход теплоты на нагрев металла при гарантированном обеспечении его заданного теплосодержания как в целом, так и в

конце каждой из зон печи. В качестве примера рассмотрена работа трехзонной методической печи с производительностями  $P=110$  т/ч и  $P=80$  т/ч, для которых определены оптимальный шаг укладки заготовок  $a=38$  мм и уточнен температурный профиль печи.

## **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Губинский, В. И. Пути энергосбережения в промышленных печах / В. И. Губинский, Р. Г. Хейфец, М. В. Губинский, Ю. А. Мартыненко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – № 5. – С. 101-103.
2. Бирюков, А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах: монография / А. Б. Бирюков. – Донецк: Ноулидж (донецкое отделение), 2012. – 248 с.
3. Ганул, А. О. Повышение эффективности использования топлива в нагревательных печах прокатного производства: дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / А. О. Ганул. — Липецк, 2019. — 146 с.
4. Гусовский, В. Л. Методики расчета нагревательных и термических печей: учебно-справочное издание / В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.
5. Повышение точности определения теплового состояния металла в методической зоне проходной печи при использовании инженерных методов / А. Б. Бирюков, А. Н. Лебедев, Ю. О. Туруллина, С. А. Онищенко // Вестник Института гражданской защиты Донбасса: научный журнал. – 2017. – № 1. – С. 5-10.
6. Бирюков, А. Б. Методика определения температурного профиля методической печи, работающей в условиях пониженной производительности / А. Б. Бирюков, А. Н. Лебедев, Ю. О. Туруллина // Сталь. – 2017. – № 10. – С. 74-77.
7. Бирюков, А. Б. Совершенствование расчетного метода определения температурного профиля проходной печи с механизированным подом путем изменения шага раскладки заготовок / А. Б. Бирюков, Ю. О. Туруллина // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2022. – № 2. – С. 78-83.
8. Казанцев, Е. И. Промышленные печи / Е. И. Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.

*Поступила в редакцию 02.02.2023 г., рекомендована к печати 16.02.2023 г.*

## **DETERMINATION OF RATIONAL MODE PARAMETERS OF A TUNE FURNACE WITH A MECHANIZED BOTTOM WORKING UNDER CONDITIONS OF VARIABLE PRODUCTIVITY**

*Biriukov A.B., Turulina IU.O.*

When operating through-type furnaces with a mechanized hearth under conditions of variable productivity, an important criterion is the determination of rational operating parameters of the furnaces. A method is proposed for finding rational parameters by changing the step of laying blanks. In this case, the temperature profile of the furnace is determined from the condition of maintaining the enthalpy of the metal in the zones and the furnace as a whole with different landing at the level of the nominal mode. It is possible to obtain rational parameters for any performance.

**Keywords:** continuous furnace, rational regime parameters, workpiece stacking step, variable capacity, temperature profile, metal enthalpy.

### **Бирюков Алексей Борисович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, проректор ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,

Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.

E-mail: birukov.ttf@gmail.com

### **Biriukov Aleksei Borisovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Thermophysics, Vice-rector of Donetsk National Technical University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

### **Турулина Юлия Олеговна**

аспирант ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,

Российская Федерация, ДНР, г. Донецк.

E-mail: turulinay@mail.ru

### **Turulina Iuliia Olegovna**

Postgraduate student of the Donetsk National Technical University,

Russian Federation, DPR, Donetsk.

## ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 677.494.7

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТОНКОЙ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА И ИХ ИСПЫТАНИЕ

© 2023 Хуррамов М.Г.

Предлагаются ресурсосберегающие способы получения и испытания воздушного фильтрующего материала из полимерных плодов растений люффа. Изучены эксплуатационные характеристики. Материал безопасен для окружающей среды после утилизации. Количество и качество очистки воздуха в фильтре регулируется по количеству наматываемых слоев фильтрующего материала.

**Ключевые слова:** растения люффа, природные полимеры, частицы, воздушный фильтр.

**Введение.** На сегодняшний день актуальной для разработчиков современных фильтрующих материалов, остается проблема соответствия комплексу требований по физико-механическим и химическим свойствам и его безопасность для окружающей среды после утилизации [1-4].

Одним из перспективных направлений на наш взгляд, для получения фильтрующих материалов является использование возобновляемого растительного сырья без разделения растительной ткани, отвечающего вышеизложенным требованиям, которые обладают рядом ценных свойств.

Целью данного исследования является разработка наиболее доступных и ресурсосберегающих способов воздушных фильтрующих материалов и их испытание.

**Материалы и методы.** Исследования включали: аналитическое обобщение известных научных и технических результатов, лабораторные исследования с использованием физико-химических методов анализа фильтрующих материалов и полевые опыты. Измерения проведены в соответствии с нормативно-технической документацией [5, 6].

**Результаты и их обсуждение.** В качестве базовых объектов были выбраны полимерные плоды растений из рода люффа (*Luffa*), семейства тыквенных (*Cucurbitaceae*), люффа цилиндрическая (*Luffa aegyptiaca*).

Для испытания фильтрующего материала были выбраны кольцевые фильтры, которые устанавливаются на автомобилях ВАЗ с карбюраторной системой. Поток поступающего воздуха в системе, оказывает достаточно сильное давление, поэтому была выбрана эта модель.

Полевой опыт показал, что данные плоды не требуют пестицидов и гербицидов растут с поразительной быстротой, не накапливают в себе токсичных веществ, не любят пересадок, не токсичны для окружающей среды и человека. Урожайность в сухом виде 2,0-2,3 т/га.

Для изготовления фильтрующих материалов подбирали биологически зрелые сорта с цилиндрической формой плодов длиной 500 мм и с диаметром 80-100 мм. Масса одного плода без кожуры составляет 12-15 г. в сухом виде.

Способ получения фильтрующих материалов состоит из следующих этапов:

1. Обдирание кожуры и удаление семян.
2. Разрезание плодов на прямоугольные куски нужного размера по длине и ширине с параметром: 500x50x3,0 мм.
3. Формование прямоугольных кусков проводят с заутюживанием и оттягиванием. Режим формования: количество воды для увлажнения, от массы каждого сухого куска 30%; время обработки 25 сек при температуре  $t=160$  °C; вес утюга 4 кг. Такой процесс проводят для придания объёмно-пространственной формы кусков. Оттягиванием можно увеличить габаритный размер прямоугольных кусков 10-12% первоначального размера.

4. Формованные куски с габаритными размерами 500x50x3мм, последовательно соединяют с мононитками полученными из ребра, на единой заданной ленте фильтрующего материала. Параметры 1 слоя: 3500x50x3мм, поверхностная плотность составляет 345 г/м<sup>2</sup>, масса 42 г. Соединительный шов образуется с мононитью путём прокола кусков. Шов выполняется слева направо, стежки шва должны выходить за край кусков 3,0 мм, длина стежка 7,0 мм и должны быть одинаковыми по всей длине шва. После соединения кусков по всей длине шва разутюживают.

5. Полученный ленточный фильтрующий материал с длиной 3500 мм, плотнее прижима слой к слою наматывается по периметру защитного каркаса (каркас изготовлено из латуни) фильтра и конец прикрепляется с возможностью замены. При этом получается 5-6 штук фильтрующих слоев с толщиной 20мм.

Ребра, соединяющие доли кожуры, можно использовать в качестве готовой нити для соединения отдельных кусков место клея (рис. 1).

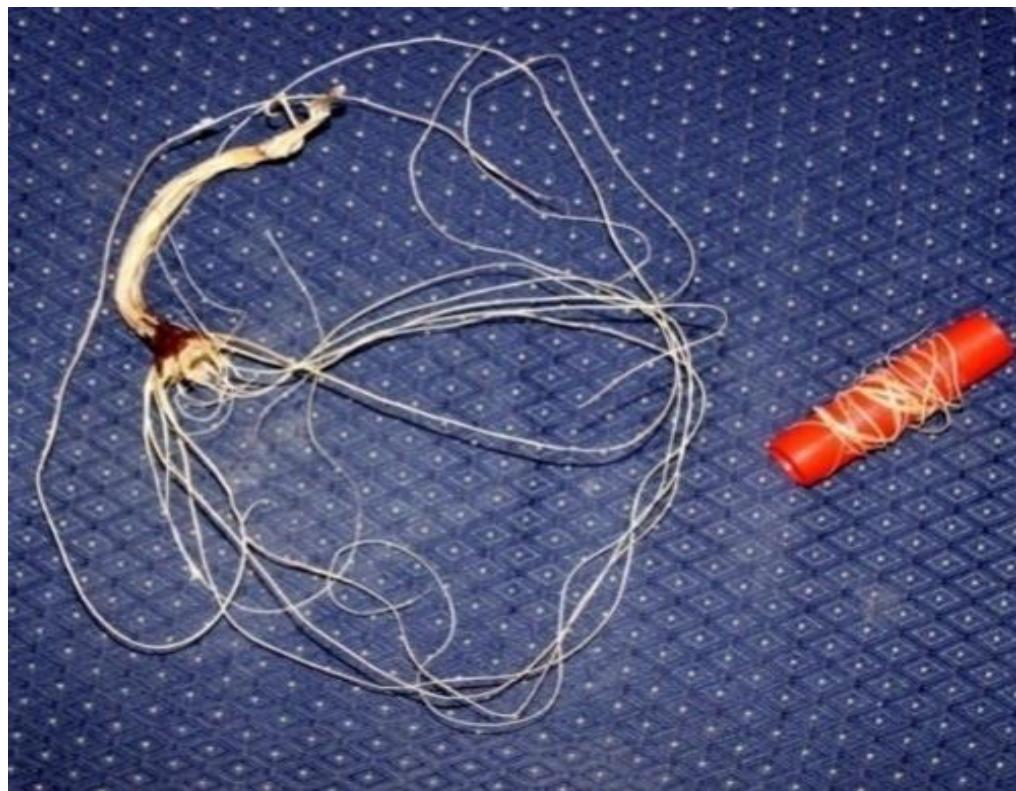


Рис. 1. Мононить, получаемая из ребра кожуры

Для улучшения механических и пошивочных свойств, сцепления в готовой нити очищенной поверхностью мононити проводится обработка способом смазки с пленкообразующими натуральными смолами местных деревьев вишни, после замачивания и очистки. Смолу наносят возвратно-поступательным движением (рис. 2). Смолы следует наносить так, чтобы они целиком покрывали поверхность мононити. Процесс размягчения смолы проводят в горячей воде при температуре 55-60 °С в течение 2 мин. После обработки проводят процесс отверждения, нанесенного молекулярной пленкой на поверхность мононити способом высыхания при комнатной температуре 25°C в течение 24 часов.



а)

б)

Рис. 2. Способ улучшения механических и пошивочных свойств мононити:  
а - очистка; б - смазка

На рис. 3 представлен процесс испытания прочности мононити из материала. Свободно выдерживаемая нагрузка мононити составляет 3,5 кг.



Рис.3. Процесс испытания прочности мононити фильтра материала

В таблице 1 представлены химический состав и физико-механические свойства полученного фильтрующего материала.

Таблица 1. Химический состав и физико-механические свойства фильтрующего материала

№	Определяемые показатели	Результаты исследования
1	Химический состав	целлюлоза до 77 %
		лигнин 10,0 – 14,0 %
		пектин 0,6 – 0,9 %
		воски 0,7 – 0,9 %
		вода до 8,0 %
2	Вес	345 г/м <sup>2</sup>
3	Толщина одного слоя	3 мм
4	Диаметр волокна	50 мкм
5	Плотность упаковки	12 %
6	Прочность при разрыве сухого	36 – 40 сН/текс
7	Прочность при разрыве мокрого	40 – 46 сН/текс
8	Общее удлинения сухого	5 – 6 %
9	Общее удлинения мокрого	7–8 %
10	Количество удерживаемой влаги после отжима	95 – 96 %
11	Сорбционная емкость	170 %
12	Термостойкость	170 °C

Результаты исследований показали, что химический состав фильтрующего материала состоит из целлюлозы и основных спутников целлюлозы. Существенную роль играет наличие нерастворимого лигнина: повышаются устойчивость к щелочам и кислотам. Содержание в волокне лигнина делает его устойчивым к действию света, погоды и микроорганизмов. Материал фильтра обладает бактерицидными свойствами и не содержит белок, поэтому не привлекает насекомых и грызунов. Материале лигнин способствует формированию воздухо-проводящих каналов. Эти проводящие каналы можно рассматривать как сито с очень маленькими ячейками.

Наличие пектина и воска способствует гибкости, эластичности, сохранению устойчивости формы и устойчивости многократному изгибу фильтрующего материала. Теплостойкость фильтрующего материала до 170 °C.

На рис. 4 представлены исходное сырьё и вид фильтрующего материала после эксплуатации (пробег 21400 км) для сопоставления цвета.

Из рисунка 4 видно, что исходное сырьё имеет сетчатую рыхлую структуру, в которой однородно распределены волокна. Частицы пыли при соприкосновении с материалами прочно фиксируются его внутрь и не сдуваются потоком воздуха.



Рис. 4. Исходное сырьё и вид фильтрующего материала после эксплуатации

**Выводы.** При способе получения воздушных фильтрующих материалов используется созревшие природные полимерные плоды растения люффа, которые являются возобновляемым экологически безопасным продуктом, обладающим невысокой стоимостью, возможностью утилизации и способностью решить задачу ресурсосбережения. Урожайность растений за год в сухом виде 2,0-2,3, т/га.

Улавливание и накапливание частиц происходит по всей глубине слоя. Наличие больших фильтрующих поверхностей позволяет очищать от твердых частиц всех размеров и отличаются высокой пылеёмкостью. Материал легко нарезается под необходимые размеры. Качество очистки воздуха в фильтре можно регулировать по количеству наматываемых слоев фильтр материала.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Новые фильтрующие материалы на основе минеральных волокон и биополимерного комплекса / Н. А. Вальчук, О. С. Бровко, И. А. Паламарчук [и др.] // Биотехнологии в химико-лесном комплексе : материалы международной научной конференции, Архангельск, 11–12 сентября 2014 года / составитель: Е.В. Новожилов. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2014. – С. 95-99.
2. Лебедев, А. С. Изучение феномена снижения эффективности фильтрации волокнистых фильтрующих материалов при загрязнении капельным аэрозолем / А. С. Лебедев, И. А. Мик // Материалы 55-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2017: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017 – С. 50.
3. Мик, И. А. Метод формования высокоеффективного самонесущего композитного фильтрующего материала из полимерных микро- и нановолокон / И. А. Мик, В. Н. Горев, Д. А. Трубицын // . – 2017. – Т. 21, № 4. – С. 13-19. – DOI 10.18412/1816-0395-2017-4-13-19. – EDN YPJTFH.
4. О перспективах совершенствования пористых перегородок воздушных фильтров и нитей, применяемых для этих целей / А. Н. Пайметов, А. А. Лушников, М. В. Ермишева, И. Н. Панин // Вестник ДИТИ. – 2013. – № 2. – С. 50-53.
5. Текстильное материаловедение: лабораторный практикум: учебное пособие / К. С. Шустов, С. М. Кириюхин, А. Ф. Давыдов [и др.] / 3-е изд.. – М.: ИНФРА-М, 2020. – 341 с.
6. ГОСТ Р ЕН 779-2014 Фильтры очистки воздуха общего назначения. Определение технических характеристик национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2019-12-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 62 с.

Поступила в редакцию 25.01.2023 г., рекомендована к печати 13.02.2023 г.

**STUDY OF RESOURCE-SAVING METHODS FOR OBTAINING FILTER MATERIALS FOR FINE AIR CLEANING AND THEIR TESTING**

***Khurramov M.G.***

Resource-saving methods for obtaining and testing an air filter material from polymer fruits of luffa plants are proposed. Studied operational characteristics. The material is environmentally friendly after disposal. The quantity and quality of air purification in the filter is regulated by the number of wound layers of filter material.

**Keywords:** loofah plants, natural polymers, particles, the air filter.

**Хуррамов Мухтор Гулович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологического образования Каршинского государственного университета,  
Узбекистан, г. Карши.

E-mail: xurramova 2011@mail.ru

**KHurramov Mukhtor Gulovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Department of Technological education of Karshi State University,  
Uzbekistan, Karshi.

## 5-ЛЕТИЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РЕДАКЦИИ НАУЧНОГО ЖУРНАЛА «ВЕСТНИК ДОННУ. СЕРИЯ Г: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

**2017-2018 гг.** 17 ноября 2017 года по инициативе заведующего кафедрой физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха, доктора технических наук, профессора Белоусова Вячеслава Владимировича и проректора по научной и инновационной деятельности, заведующего кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий, доктора технических наук, профессора Данилова Владимира Васильевича на заседании Ученого совета физико-технического факультета постановили: *ходатайствовать перед Ученым советом университета об открытии научного журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки».*

Так, начался приём статей в первый номер журнала, а также были сформированы проекты Устава редакции, структуры и персонального состава редакционной коллегии, которые были приняты на первом заседании редколлегии 20.04.2018 года. Затем, 27.04.2018 года решением Ученого совета университета были утверждены вышеуказанные документы и рекомендован к изданию первый номер журнала.

Первый номер начался с приветственного слова первого главного редактора журнала доктора технических наук, профессора Белоусова В.В. об обосновании необходимости открытия журнала, его задачах и дальнейших планах. Заместителем главного редактора был назначен доктор технических наук, профессор Данилов В.В., а ответственным секретарем – аспирант, ассистент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий Третьяков И.А. В состав редколлегии вошли не только представители Донецкого национального университета, но и ведущие ученые Донецкого региона и Российской Федерации – специалисты в соответствующих отраслях науки, представляющие не только вузовскую, но и производственную науку. Качественный состав членов редколлегии, осуществляющих рецензирование поступающих в редакцию материалов показан на рисунке далее.

**Количество членов редколлегии по рубрикам в 2018 году**



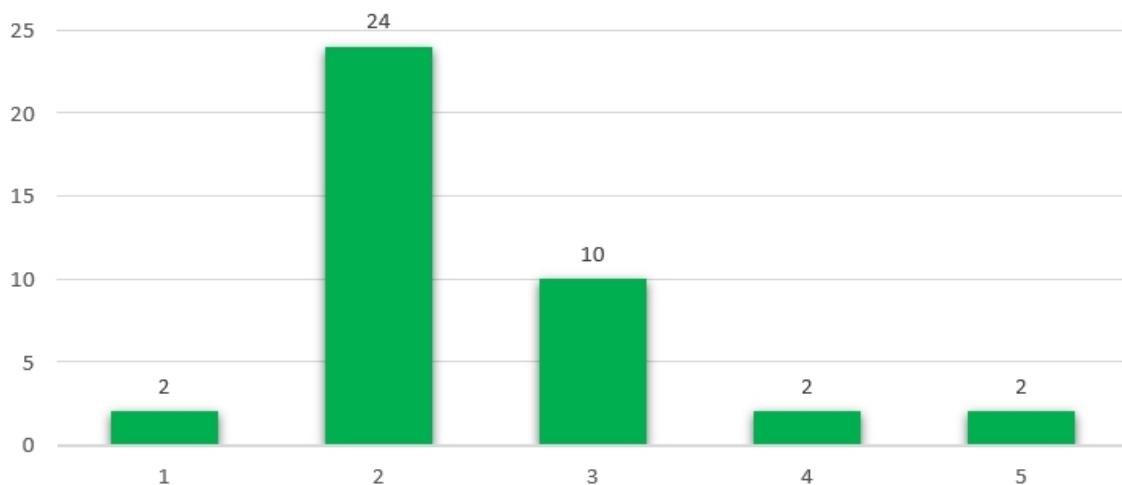
За первый год деятельности журнала вышло 45 статей, из которых 40 – научные статьи, 5 – материалы информационного характера. Информация по распределению статей по тематическим рубрикам приведена на рисунке далее.

### Количество статей по рубрикам в 2018 году



Среднее количество соавторов одной статьи за отчетный год составляет 2,45. Такая цифра означает, что количество соавторов в целом соответствует объему проведенных в статье исследований. Информация о распределении статей по количеству авторов приведена на рисунке далее.

### Количество соавторов 1 статьи в 2018 году

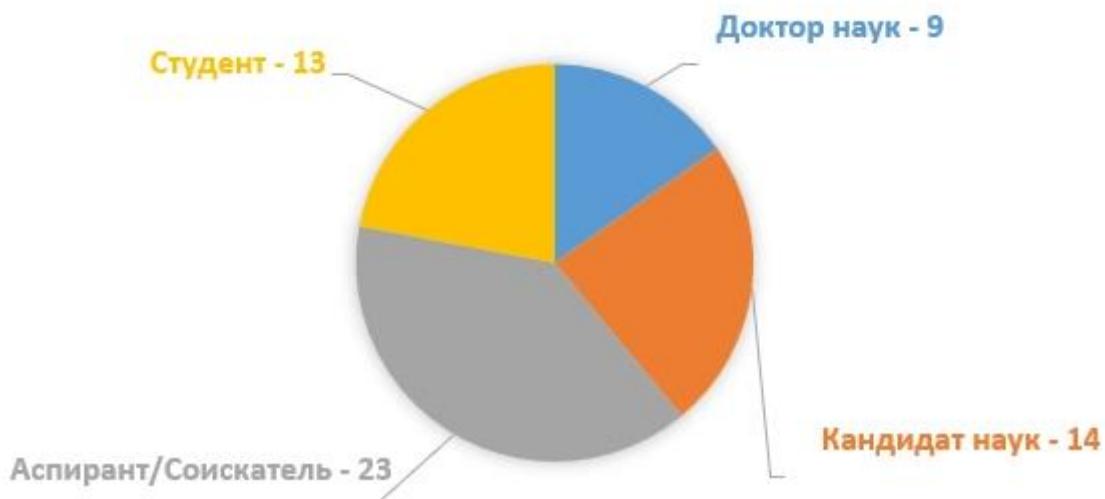


Переходим к статистической информации непосредственно о самих авторах. За отчетный год в журнале опубликованы работы 59 уникальных авторов из 3 стран и 7 различных организаций. Предложена следующая классификация характеристик авторов:

- доктор наук;
- кандидат наук;
- аспирант/соискатель (сюда также отнесены все лица без ученой степени (кроме студентов), в т.ч. научные сотрудники, инженеры и прочие работники предприятий);
- студенты (опубликовавшиеся в соавторстве с научными руководителями, в т.ч. магистранты).

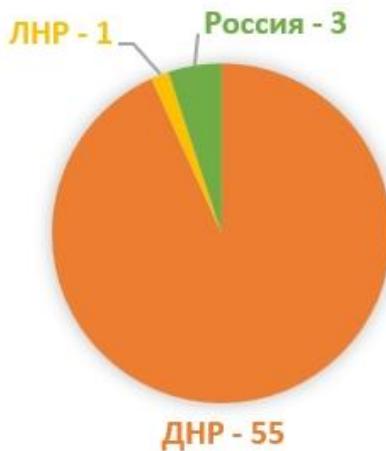
Информация по предложенной классификации авторов показана на рисунке далее. В процентном соотношении доктора и кандидаты наук составляют 39% от общего количества авторов, аспиранты и соискатели – так же 39%, студенты – оставшиеся 22%.

## ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОРОВ 2018 ГОДА

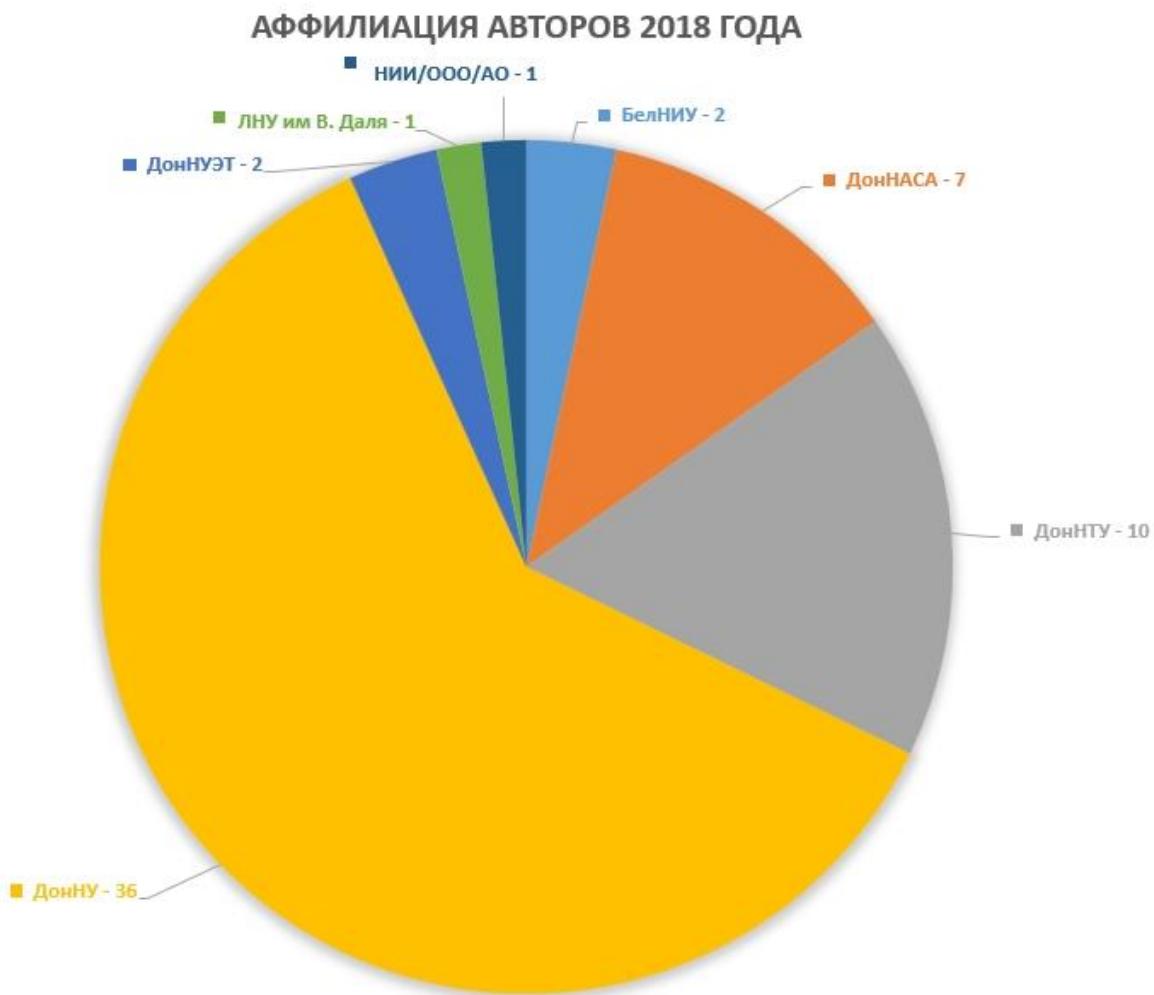


За первый год географически авторы представляют преимущественно Донецкую Народную Республику (93%), однако присутствуют авторы из соседней Луганской Народной Республики (2%), а также из Российской Федерации (5%). Информация по географии авторов наглядно представлена на рисунке далее.

## ГЕОГРАФИЯ АВТОРОВ 2018 ГОДА



И, наконец, распределение авторов по организациям сделано, учитывая следующее: в «НИИ/ООО/АО» объединены научно-исследовательские институты, общества с ограниченной ответственностью, акционерные общества и прочие частные организации. Из общего числа организаций большинство авторов являются представителями Донецкого национального университета (61%), так же можно выделить Донецкий национальный технический университет (17%) и Донбасскую национальную академию строительства и архитектуры (12%). Полная информация по аффилиации авторов приведена на рисунке далее.



Подводя итоги 2018 года: периодичность выпуска журнала соблюдена (выпущено 4 номера), количество соавторов соответствует объему проведенных в статьях исследований, поставленные цели и задачи выполняются. Таким образом, журнал можно считать состоявшимся и уверенно переходить к следующему этапу.

**2019 год.** Важным событием для журнала в начале 2019 года стало заключение дополнительного соглашения с Научной Электронной Библиотекой о включении журнала в национальную информационно-аналитическую систему Российской индекс научного цитирования (РИНЦ) (Лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г. в редакции от 27.03.2019 г.) и размещение всех номеров начиная с 2018 года.

Кроме того, журнал начинает индексироваться в международной индексационной научометрической базе Index Copernicus International Journals Master List.

Также проводится колоссальная работа по подготовке и подаче документов в Министерство образования и науки Донецкой Народной Республики для включения журнала в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК). В связи с этим происходит расширение состава редколлегии ведущими специалистами, внесшими значительный вклад в развитие таких областей знаний, как информатика, вычислительная техника и управление, энергетика, строительство и архитектура.

Количественный состав членов редколлегии, осуществляющих рецензирование поступающих в редакцию материалов в 2019 году показан на рисунке далее.

#### Количество членов редколлегии по рубрикам в 2019 году



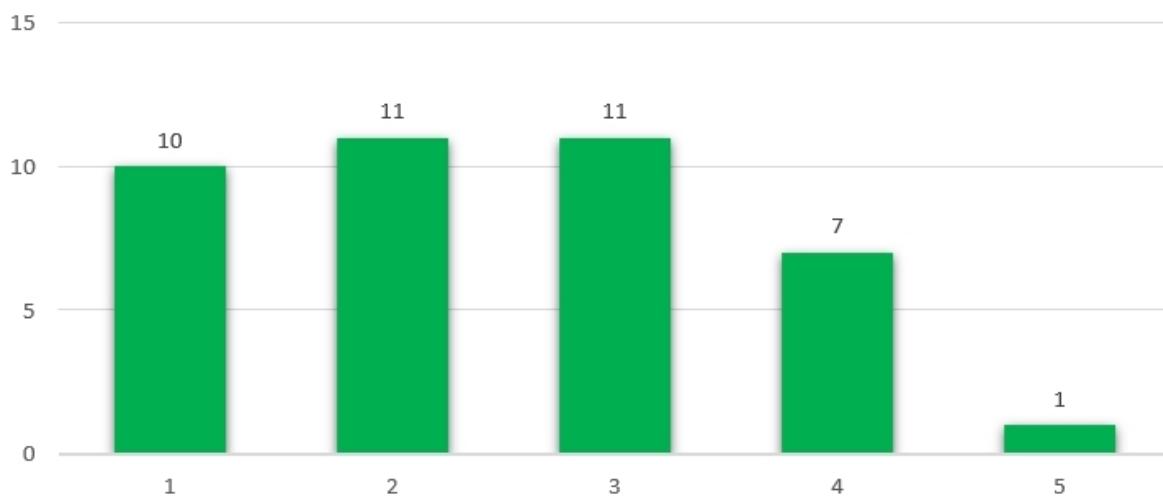
За второй год деятельности журнала вышло 47 статей, из которых 40 – научные статьи, 7 – материалы информационного (в т.ч. юбилейного) характера. В сравнении с предшествующим годом несущественно увеличилось общее количество статей. Информация по распределению статей по тематическим рубрикам приведена на рисунке далее.

#### Количество статей по рубрикам в 2019 году



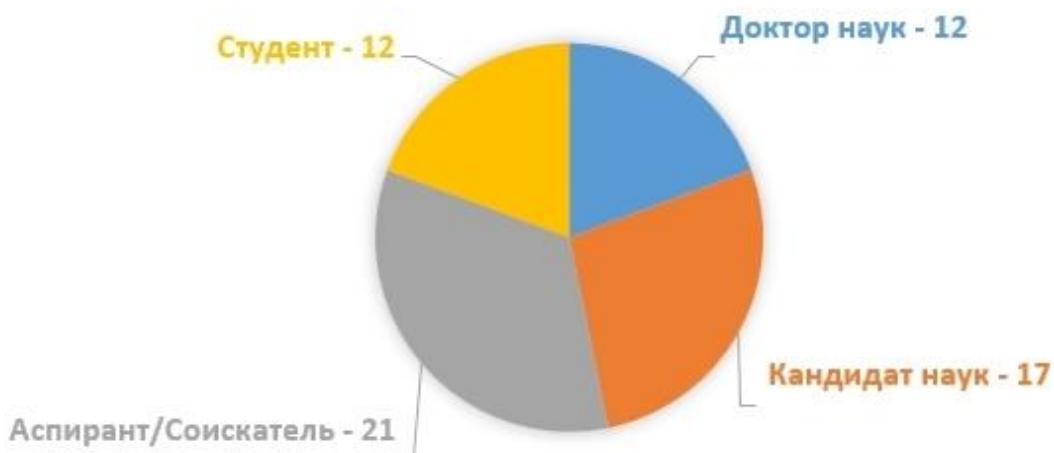
Среднее количество соавторов одной статьи за отчетный год, как и в предшествующем году, составляет 2,45. Такая цифра означает, что количество соавторов в целом соответствует объему проведенных в статье исследований. Информация о распределении статей по количеству авторов приведена на рисунке далее.

### Количество соавторов 1 статьи в 2019 году



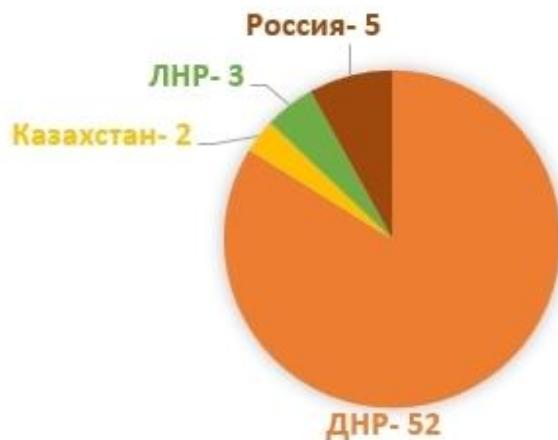
Переходим к статистической информации непосредственно о самих авторах. За отчетный год в журнале опубликованы работы 62 уникальных авторов из 4 стран и 8 различных организаций. Применена классификация характеристик авторов, предложенная в предшествующем году, которая показана на рисунке далее. В процентном соотношении доктора и кандидаты наук составляют 47% от общего количества авторов, аспиранты и соискатели - 34%, студенты – оставшиеся 19%. В сравнении с предшествующим годом увеличилось количество докторов и кандидатов наук среди авторов.

### ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОРОВ 2019 ГОДА



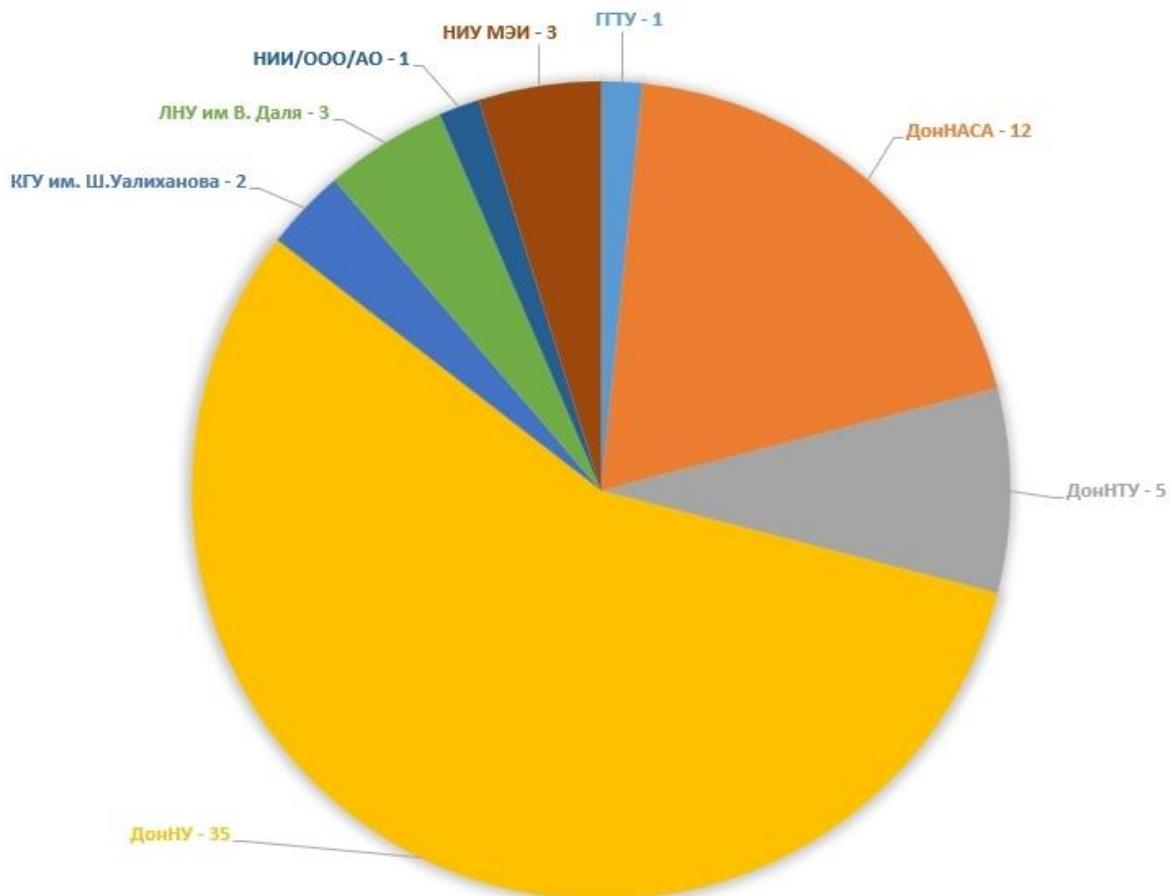
За отчетный год географически авторы снова представляют преимущественно Донецкую Народную Республику (84%), однако увеличилось число авторов из Луганской Народной Республики (5%) и Российской Федерации (8%), а также появились авторы из Казахстана (3%). Информация по географии авторов наглядно представлена на рисунке далее.

## ГЕОГРАФИЯ АВТОРОВ 2019 ГОДА



И, наконец, распределение авторов по организациям. Из общего числа организаций большинство авторов являются представителями Донецкого национального университета (56%), так же можно выделить Донбасскую национальную академию строительства и архитектуры (19%) и Донецкий национальный технический университет (8%). Полная информация по аффилиации авторов приведена на рисунке далее.

## АФФИЛИАЦИЯ АВТОРОВ 2019 ГОДА



Подводя итоги 2019 года: периодичность выпуска журнала соблюдена (выпущено 4 номера), количество соавторов соответствует объему проведенных в статьях исследований, поставленные цели и задачи продолжают выполняться, количество статей и авторов увеличивается, так же расширяется их география и аффилиация. Таким образом, можно переходить к следующему этапу.

**2020 год.** Год начинается с положительных новостей. Так, приказом Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики №440 от 06.03.2020 г. журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим группам научных специальностей:

05.11.00 – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы;

05.12.00 – Радиотехника и связь;

05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление.

Однако, далее началась череда плохих новостей. 2 июня 2020 года скоропостижно уходит из жизни первый главный редактор журнала, доктор технических наук, профессор Белоусов Вячеслав Владимирович. Главным редактором на заседании редколлегии избирается доктор технических наук, профессор Данилов Владимир Васильевич. На место заместителя главного редактора избирается доктор технических наук, профессор Недопёкин Фёдор Викторович, который скоропостижно покидает нас 22 октября 2020 года. На заседании редколлегии заместителем главного редактора избирается доктор технических наук, старший научный сотрудник Симоненко Александр Петрович.

Для восполнения потерь в составе редколлегии, а также в связи с планами по расширению рубрик, соответствующих научным специальностям «Промышленная теплоэнергетика» и «Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства» до групп научных специальностей «Энергетика» и «Строительство и архитектура», значительно расширяется состав редколлегии соответствующими специалистами. Количественный состав членов редколлегии, осуществляющих рецензирование поступающих в редакцию материалов в 2020 году показан на рисунке далее.

**Количество членов редколлегии по рубрикам в 2020 году**



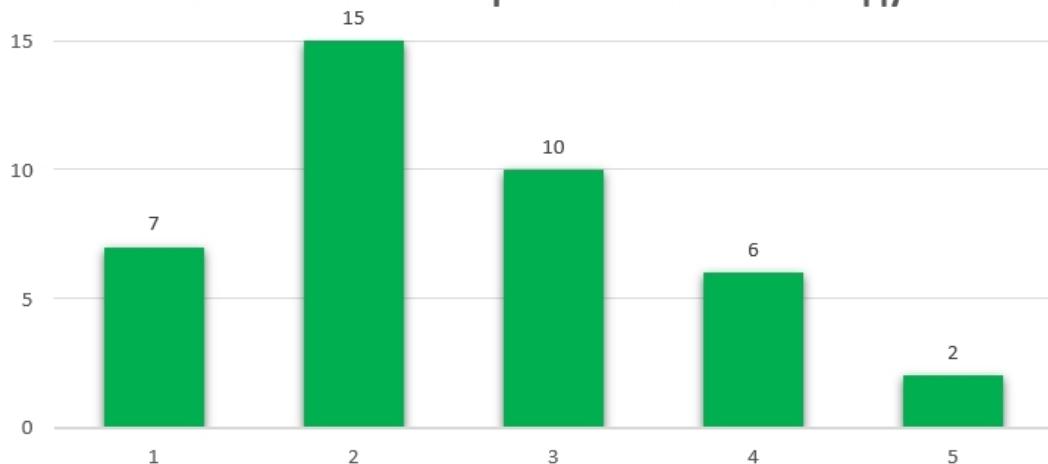
За третий год деятельности журнала вышло 53 статьи, из которых 40 – научные статьи, 13 – материалы информационного (в т.ч. юбилейного и памятного) характера. В сравнении с предшествующим годом увеличилось общее количество статей. Информация по распределению статей по тематическим рубрикам приведена на рисунке далее.

### Количество статей по рубрикам в 2020 году



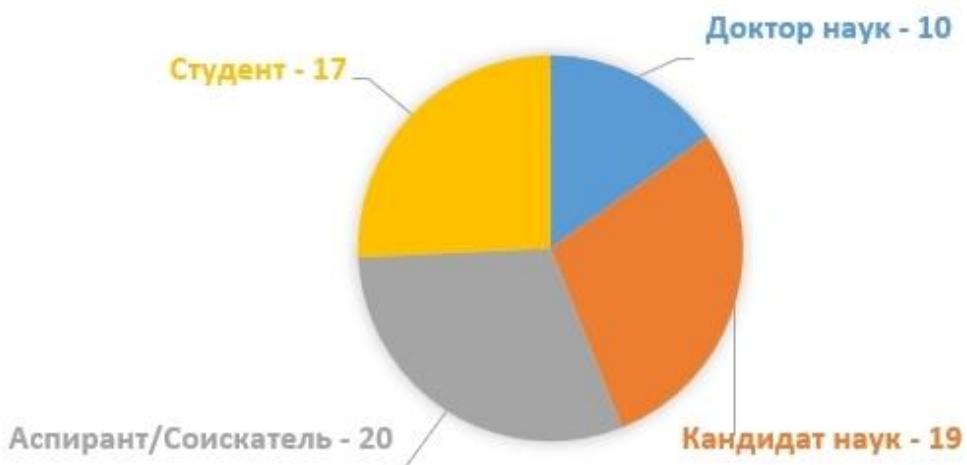
Среднее количество соавторов одной статьи за отчетный год оказалось несущественно выше, чем в предшествующем году, и составляет 2,53. Такое количество соавторов продолжает соответствовать объему проведенных в статье исследований. Информация о распределении статей по количеству авторов приведена на рисунке далее.

### Количество соавторов 1 статьи в 2020 году



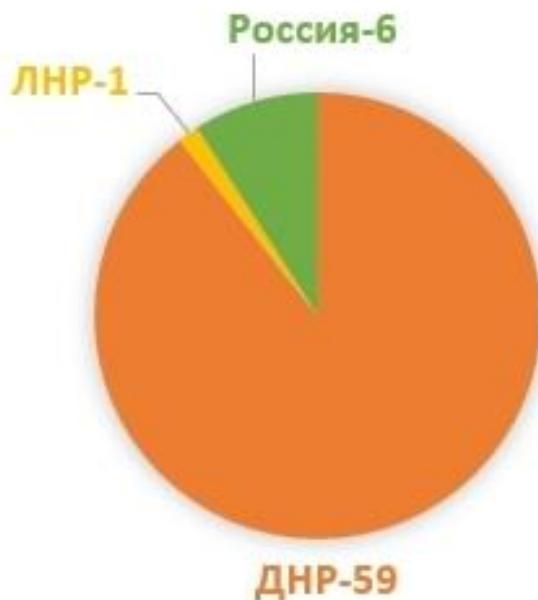
Переходим к статистической информации непосредственно о самих авторах. За отчетный год в журнале опубликованы работы 66 уникальных авторов из 3 стран и 8 различных организаций. Классификация характеристик авторов статей показана на рисунке далее. В процентном соотношении доктора и кандидаты наук составляют 44% от общего количества авторов, аспиранты и соискатели - 30%, студенты – оставшиеся 26%. В сравнении с предшествующим годом незначительно уменьшилось количество докторов и кандидатов наук, а также увеличилось количество студентов среди авторов.

## ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОРОВ 2020 ГОДА

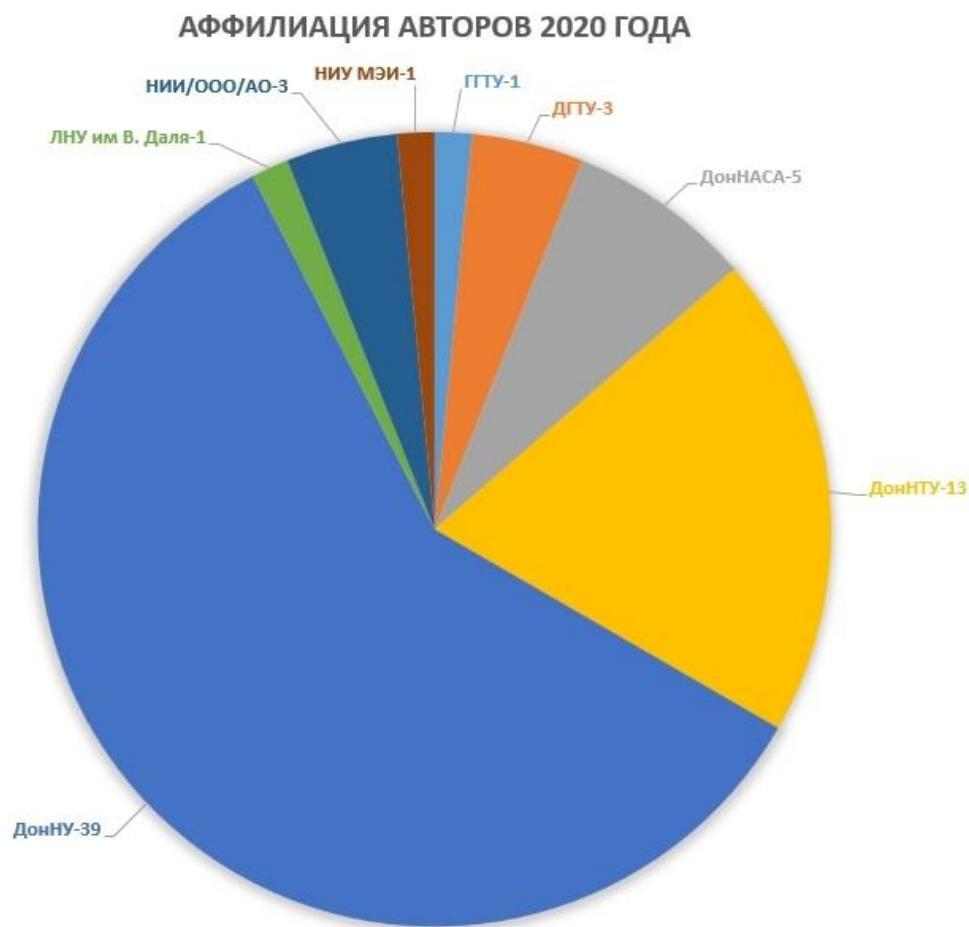


За отчетный год географически авторы снова представляют преимущественно Донецкую Народную Республику (89%), увеличилось число авторов из Российской Федерации (9%), имеются авторы из Луганской Народной Республики (2%). Информация по географии авторов наглядно представлена на рисунке далее.

## ГЕОГРАФИЯ АВТОРОВ 2020 ГОДА



И, наконец, распределение авторов по организациям. Из общего числа организаций большинство авторов являются представителями Донецкого национального университета (59%), так же снова можно выделить Донецкий национальный технический университет (20%) и Донбасскую национальную академию строительства и архитектуры (8%). Полная информация по аффилиации авторов приведена на рисунке далее.



Подводя итоги 2020 года: периодичность выпуска журнала соблюдена (выпущено 4 номера), количество соавторов соответствует объему проведенных в статьях исследований, поставленные цели и задачи продолжают выполняться, количество статей и авторов увеличивается, расширяется их аффилиация, и самое главное – журнал включен в Перечень ВАК. Таким образом, можно переходить к следующему этапу.

**2021 год.** Планы 2020 года по расширению рубрик, соответствующих научным специальностям «Промышленная теплоэнергетика» и «Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства» до групп научных специальностей «Энергетика» и «Строительство и архитектура», к сожалению, реализовать так и не удалось. Так, приказом Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики №42 от 26.01.2021 года дополнен перечень специальностей, по которым журнал включен в Перечень ВАК:

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика;

05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства.

В середине года, 26 июля 2021, уходит из жизни заместитель главного редактора журнала, доктор технических наук, старший научный сотрудник Симоненко Александр Петрович. В конце года на заседании редколлегии заместителем главного редактора избирается кандидат технических наук Третьяков Игорь Александрович, а на его место (ответственный секретарь) – Пометун Екатерина Дмитриевна. Кроме того, были и другие изменения в составе редакционной коллегии по различным причинам. Так, количественный состав членов редколлегии, осуществляющих рецензирование поступающих в редакцию материалов в 2021 году показан на рисунке далее.

### Количество членов редколлегии по рубрикам в 2021 году



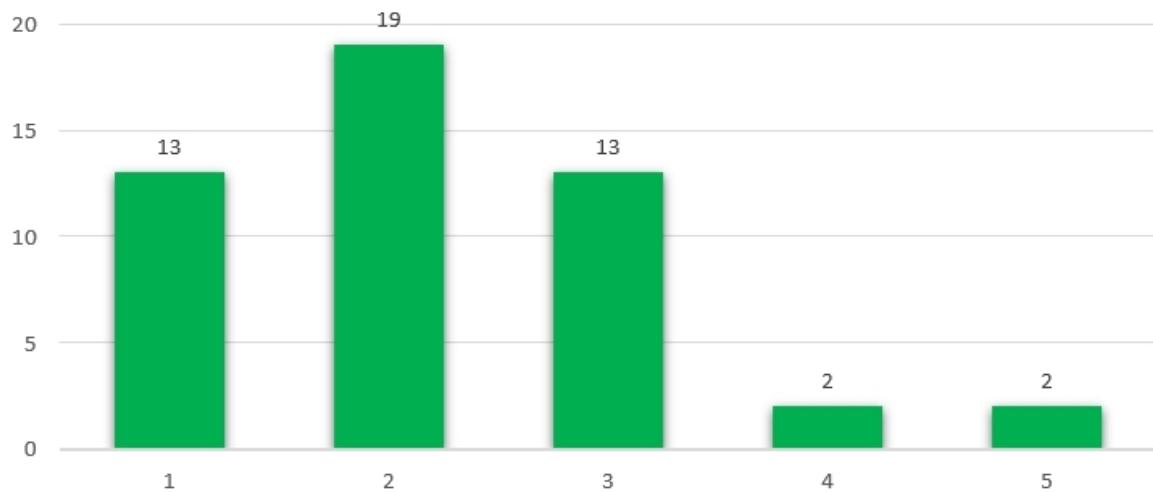
За четвертый год деятельности журнала вышло 59 статей, из которых 49 – научные статьи, 10 – материалы информационного (в т.ч. поздравительного, юбилейного и памятного) характера. В сравнении с предшествующим годом увеличилось общее количество статей, в т.ч. и количество научных статей. Информация по распределению статей по тематическим рубрикам приведена на рисунке далее.

### Количество статей по рубрикам в 2021 году



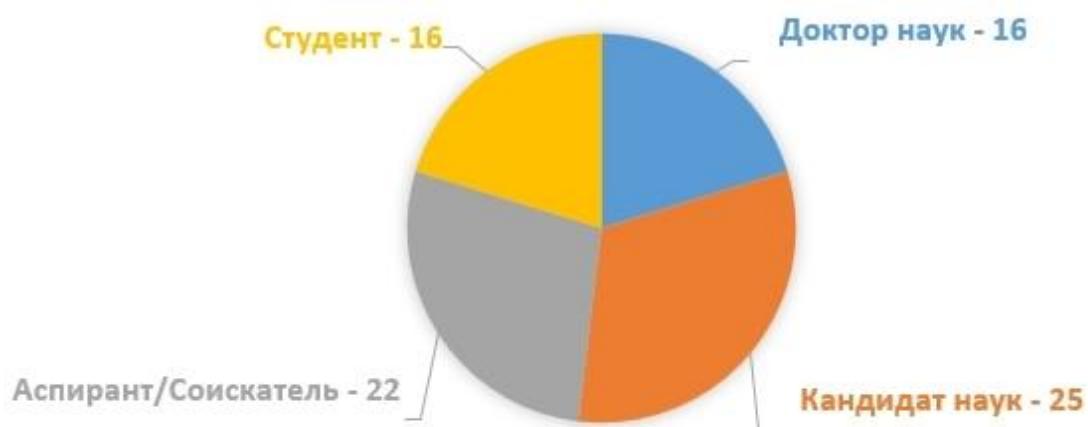
Среднее количество соавторов одной статьи за отчетный год оказалось ниже, чем в предшествующем году, и составляет 2,20. Такое количество соавторов продолжает соответствовать объему проведенных в статье исследований. Информация о распределении статей по количеству авторов приведена на рисунке далее.

### Количество соавторов 1 статьи в 2021 году



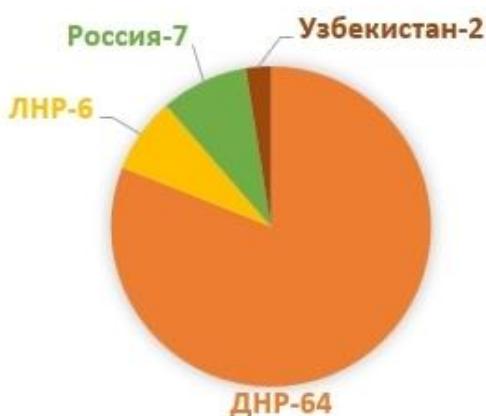
Переходим к статистической информации непосредственно о самих авторах. За отчетный год в журнале опубликованы работы 79 уникальных авторов из 4 стран и 13 различных организаций. Классификация характеристик авторов статей показана на рисунке далее. В процентном соотношении доктора и кандидаты наук составляют 52% от общего количества авторов, аспиранты и соискатели - 28%, студенты – оставшиеся 20%. В сравнении с предшествующим годом значительно увеличилось количество докторов и кандидатов наук, а также уменьшилось количество студентов среди авторов.

### ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОРОВ 2021 ГОДА



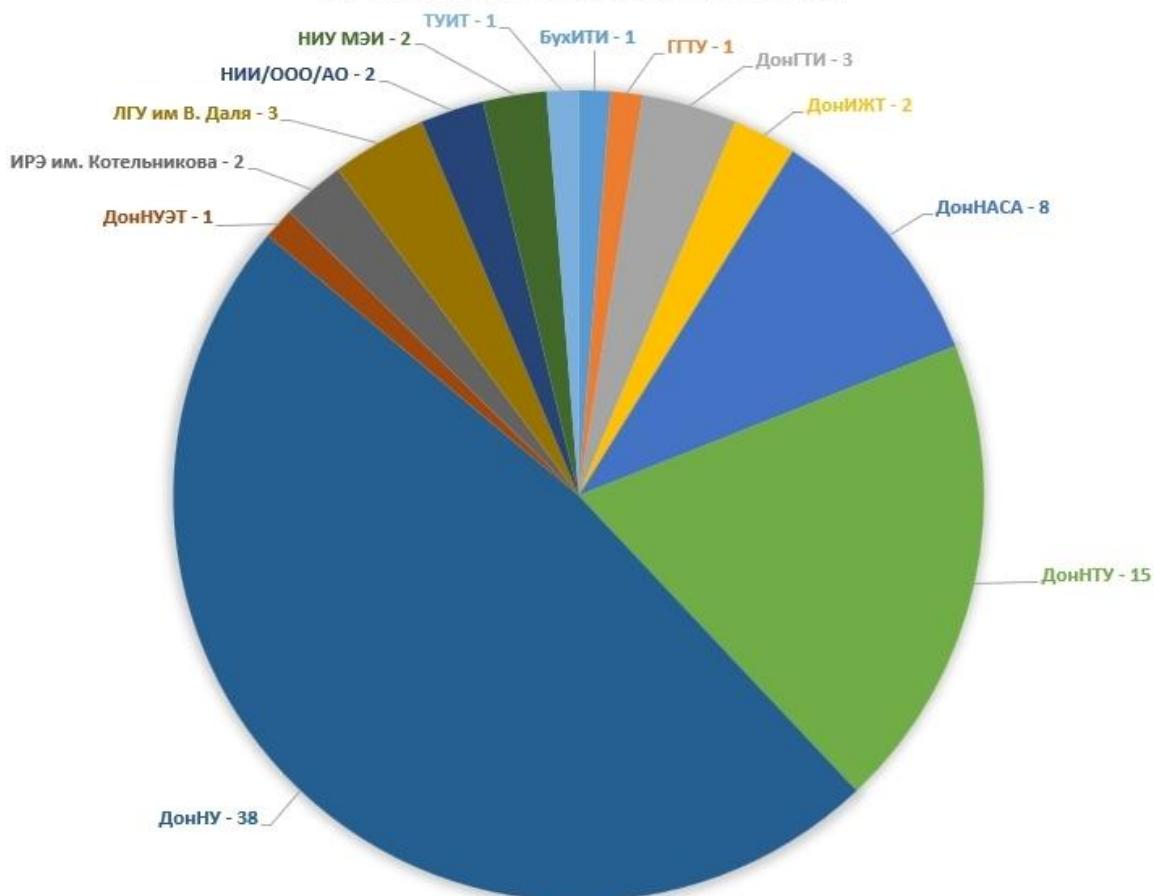
За отчетный год географически авторы снова представляют преимущественно Донецкую Народную Республику (81%), увеличилось число авторов из Луганской Народной Республики (8%), приблизительно на том же уровне остается число авторов из Российской Федерации (9%), появились авторы из Казахстана (2%). Информация по географии авторов наглядно представлена на рисунке далее.

## ГЕОГРАФИЯ АВТОРОВ 2021 ГОДА



И, наконец, распределение авторов по организациям. Из общего числа организаций большинство авторов являются представителями Донецкого национального университета (48%), так же снова можно выделить Донецкий национальный технический университет (19%) и Донбасскую национальную академию строительства и архитектуры (10%). Полная информация по аффилиации авторов приведена на рисунке далее.

## АФФИЛИАЦИЯ АВТОРОВ 2021 ГОДА



Подводя итоги 2021 года: периодичность выпуска журнала соблюдена (выпущено 4 номера), количество соавторов соответствует объему проведенных в статьях исследований, поставленные цели и задачи продолжают выполняться. Количество статей и авторов увеличивается, расширяется их география и аффилиация, также растет количество докторов и кандидатов наук среди них. Теперь можно заявить, что журнал успешно прошел стадию становления и все рубрики журнала, соответствующие группам научных специальностей (специальностям), включены в Перечень ВАК. Таким образом, можно переходить к следующему этапу.

**2022 год.** Вновь начавшиеся активные боевые действия на Донбассе в начале года внесли свои корректизы в деятельность редакции. Однако, деятельность редакции по производству, выпуску и распространению журнала удается сохранить.

В связи с вхождением Донецкой Народной Республики в состав Российской Федерации на заседании редколлегии принято решение актуализировать названия рубрик журнала в соответствии с Номенклатурой научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, утвержденной приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24.02.2021 г. № 118 (с изменениями и дополнениями от 27.09.2021 г., 11.05.2022 г.). В связи с этим, статистическая информация по этому году будет представлена с учетом объединения и переименования рубрик журнала. Однако, группы научных специальностей (специальности), по которым журнал включен в Перечень ВАК остаются без изменений. Так, важной задачей для журнала становится включение в Перечень ВАК Российской Федерации по специальностям новой Номенклатуры.

Учитывая вышесказанное, снова наблюдается динамика в составе редакционной коллегии. Кроме того, в отчетном году в состав редколлегии введен Академик РАН, доктор технических наук, профессор Соколов Игорь Анатольевич. Так, количественный состав членов редколлегии, осуществляющих рецензирование поступающих в редакцию материалов в 2022 году показан на рисунке далее.

**Количество членов редколлегии по рубрикам в 2022 году**



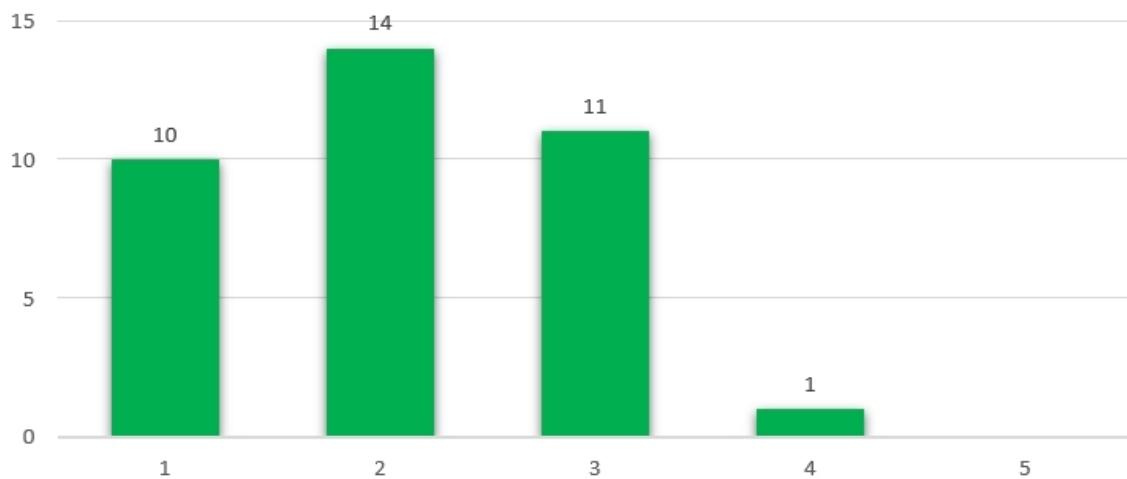
За пятый год деятельности журнала вышло 43 статьи, из которых 36 – научные статьи, 7 – материалы информационного (в т.ч. юбилейного и поздравительного) характера. В сравнении с предшествующим годом из-за активных боевых действий значительно уменьшилось количество статей. Информация по распределению статей по тематическим рубрикам приведена на рисунке далее.

### Количество статей по рубрикам в 2022 году



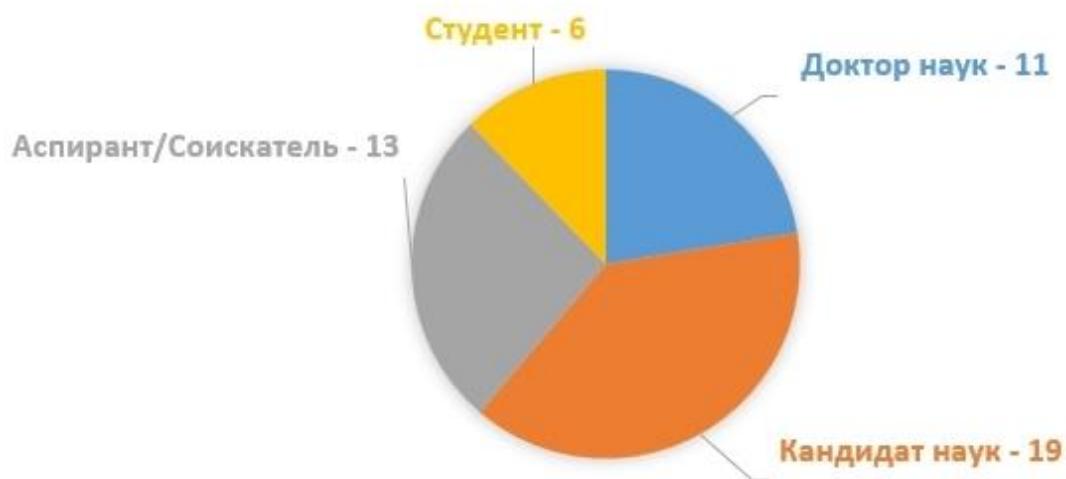
Среднее количество соавторов одной статьи за отчетный год снова оказалось ниже, чем в предшествующем году, и составило 2,08. Такое количество соавторов продолжает соответствовать объему проведенных в статье исследований. Информация о распределении статей по количеству авторов приведена на рисунке далее.

### Количество соавторов 1 статьи в 2022 году



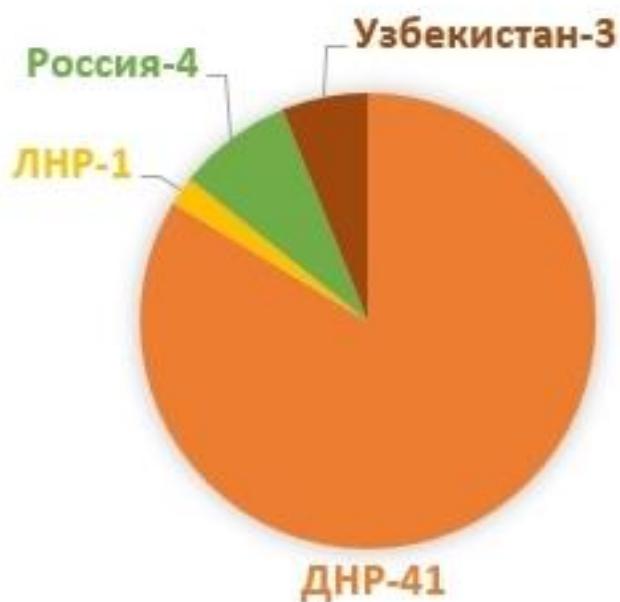
Переходим к статистической информации непосредственно о самих авторах. За отчетный год в журнале опубликованы работы 49 уникальных авторов из 4 стран и 9 различных организаций. Классификация характеристик авторов статей показана на рисунке далее. В процентном соотношении доктора и кандидаты наук составляют 61% от общего количества авторов, аспиранты и соискатели - 27%, студенты – оставшиеся 12%. В сравнении с предшествующим годом значительно увеличилось количество докторов и кандидатов наук, а также значительно уменьшилось количество студентов среди авторов.

## ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОРОВ 2022 ГОДА

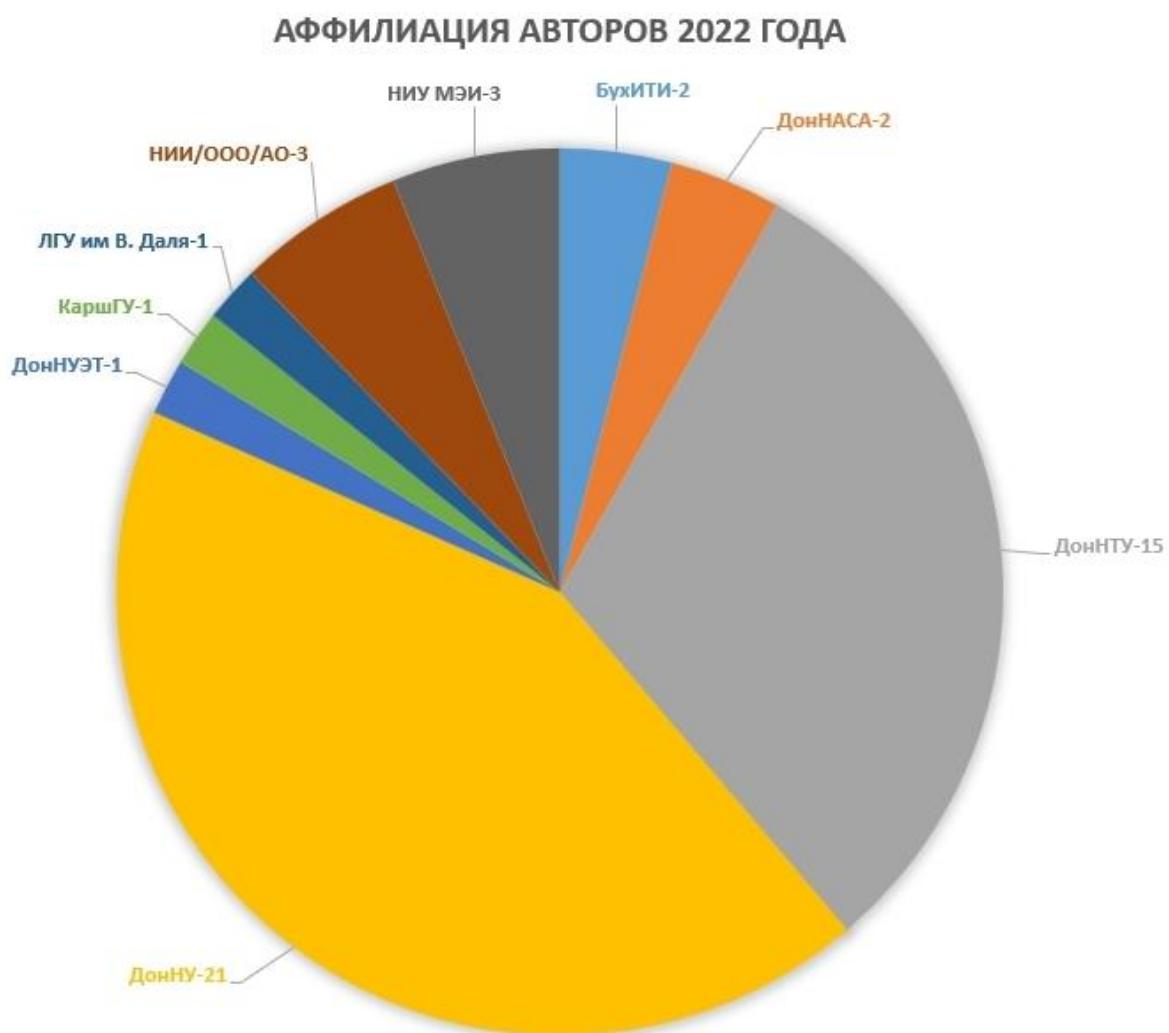


За отчетный год географически авторы снова представляют преимущественно Донецкую Народную Республику (84%), приблизительно на том же уровне остается число авторов из Российской Федерации (8%), появились авторы из Узбекистана (6%) уменьшилось число авторов из Луганской Народной Республики (2%). Информация по географии авторов наглядно представлена на рисунке далее.

## ГЕОГРАФИЯ АВТОРОВ 2022 ГОДА



И, наконец, распределение авторов по организациям. Из общего числа организаций большинство авторов являются представителями Донецкого национального университета (43%) и Донецкого национального технического университета (31%). Полная информация по аффилиации авторов приведена на рисунке далее.



Подводя итоги 2022 года: не смотря на активные боевые действия, деятельность редакции и выпуск журнала удалось сохранить, периодичность выпуска журнала соблюдена (выпущено 4 номера), количество соавторов соответствует объему проведенных в статьях исследований, поставленные цели и задачи продолжают выполняться. Таким образом, можно переходить к последнему этапу данного статистического обзора.

**2018-2022 гг.** В завершающем пункте данного информационно-статистического обзора приводится обобщающая информация за пять лет деятельности редакции, с учетом объединения и переименования рубрик журнала в 2022 году.

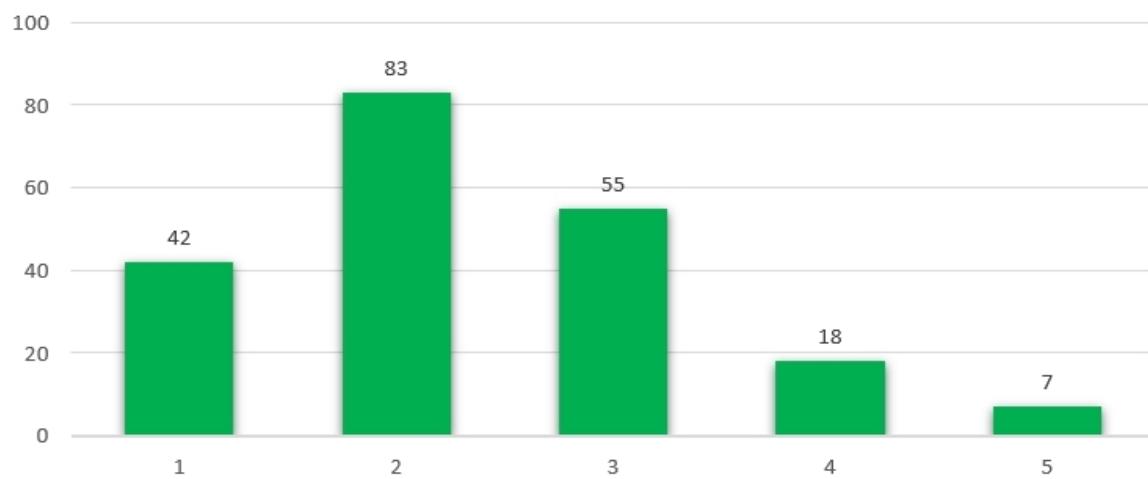
Так, за пять лет деятельности журнала вышло 247 статей, из которых 205 – научные статьи, 42 – материалы информационного (в т.ч. юбилейного, памятного и поздравительного) характера. Наиболее востребованной рубрикой является «Информационные технологии и телекоммуникации» - 33% от общего количества статей, рубрика «Электроника, фотоника, приборостроение и связь» - 23%, рубрика «Энергетика и электротехника» - 14%, рубрика «Техносферная безопасность» - 13%, оставшиеся 17% - материалы информационного характера. Информация по распределению статей по тематическим рубрикам приведена на рисунке далее.

### Количество статей по рубрикам за 2018-2022 гг.



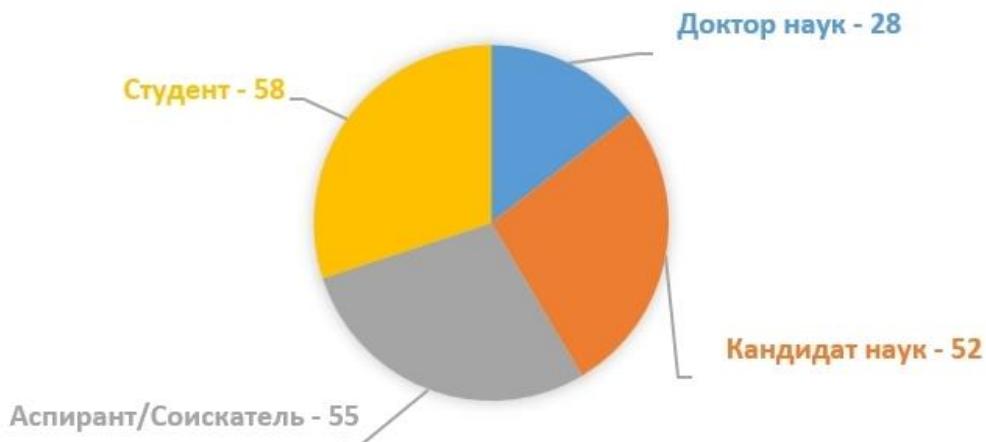
Среднее количество соавторов одной статьи за отчетный период составляет 2,34. При округлении до целого числа – 2, что соответствует объему проведенных в статье исследований. Информация о распределении статей по количеству авторов приведена на рисунке далее.

### Количество соавторов 1 статьи в 2018-2022 годах



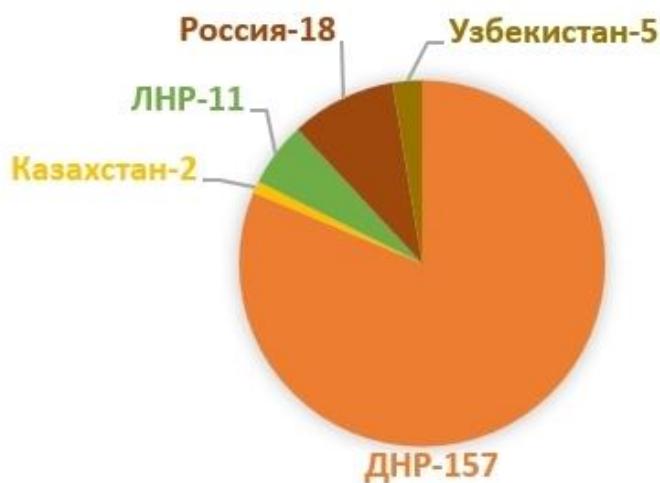
Переходим к статистической информации непосредственно о самих авторах. За отчетный период в журнале опубликованы работы 193 уникальных авторов из 5 стран и 16 различных организаций. При расчете учтены изменения характеристик авторов, публиковавшихся ранее (ученых степеней, стран и организаций) и посчитаны данные, актуальные на момент их последней публикации. Классификация характеристик авторов статей показана на рисунке далее. В процентном соотношении доктора (15%) и кандидаты (27%) наук составляют 42% от общего количества авторов, аспиранты и соискатели - 28%, студенты – оставшиеся 30%.

## ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОРОВ 2018-2022 ГГ.

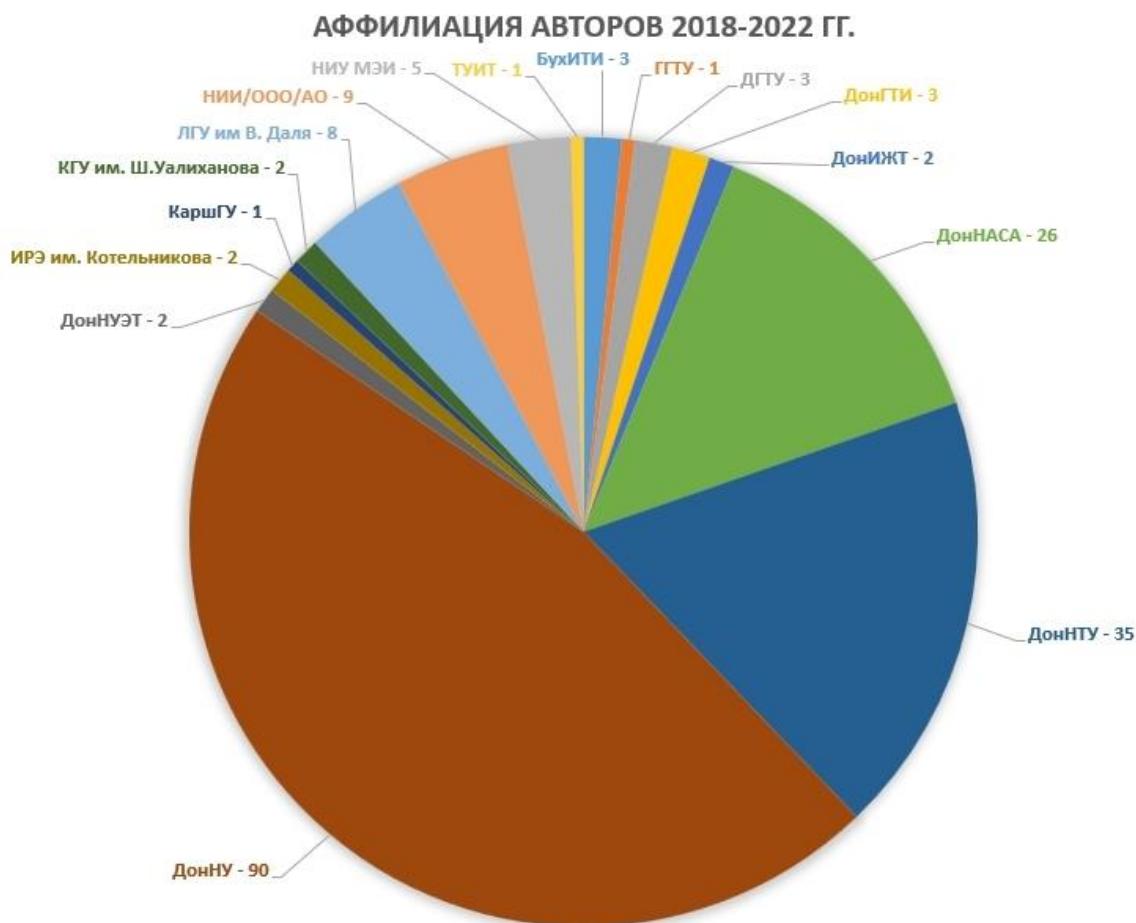


За отчетный период географически авторы представляют преимущественно Донецкую Народную Республику - 81%, Российскую Федерацию - 9%, Луганскую Народную Республику - 6%, Узбекистан - 3%, Казахстан - 1%. Здесь Донецкая Народная Республика и Луганская Народная Республика отражены отдельно, т.к. субъектами Российской Федерации они стали только к третьему номеру журнала за 2022 год. Информация по географии авторов наглядно представлена на рисунке далее.

## ГЕОГРАФИЯ АВТОРОВ 2018-2022 ГГ.



И, наконец, распределение авторов по организациям. Из общего числа организаций большинство авторов являются представителями Донецкого национального университета (47%), Донецкого национального технического университета (18%) и Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (13%). Остальные организации составляют не более 5% от общего количества. Полная информация по аффилиации авторов приведена на рисунке далее.



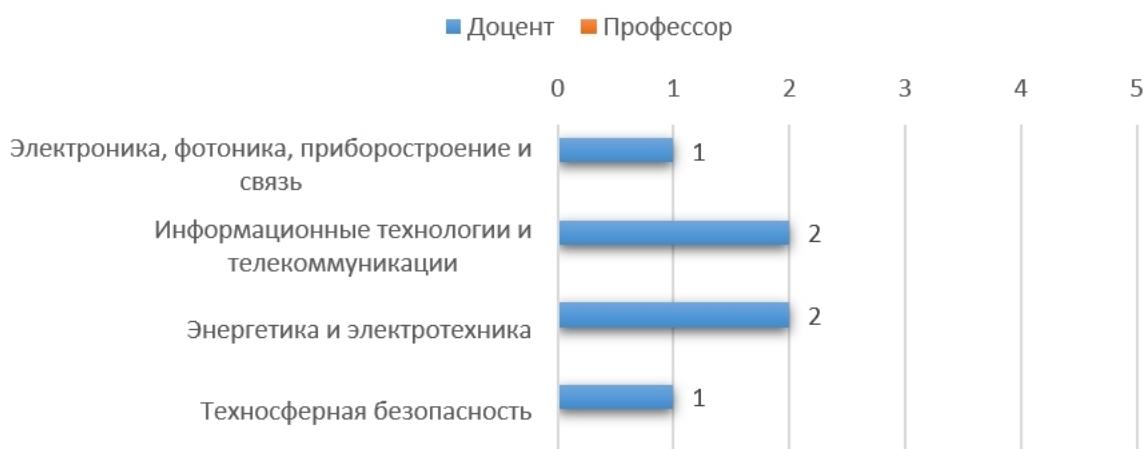
Еще хотелось бы показать практический вклад деятельности редакции в науку в виде статей в журнале, которые авторы указывали при защите диссертаций в списках работ, опубликованных по темам своих диссертаций, и в списках научных трудов соискателей ученого звания. Так, за пять лет деятельности редакции, авторами статей в журнале (которые были указаны в списках работ) было защищено 4 докторских и 13 кандидатских диссертаций. Информация по научным направлениям, по которым были защищены диссертации приведена на рисунке далее.

### Количество защищённых диссертаций за 2018-2022 гг.



Так же, за пять лет деятельности редакции, 6 авторами статей в журнале (которые были указаны в списках работ) были получены ученые звания доцента. Информация по научным направлениям, по которым были получены звания приведена на рисунке далее.

## Количество полученных ученых званий за 2018-2022 гг.



Кроме того, еще 1 кандидатская диссертация нашего автора принята к защите и готовятся аттестационные дела на получение ученого звания доцента в 2023 году как минимум 3 наших авторов.

Итак, подводя итоги деятельности редакции за 2018-2022 гг.: не смотря на все трудности, за 5 лет выпущено 20 номеров общим объемом 1909 страниц (222 условных печатных листа), журнал включен и индексируется в научометрических базах РИНЦ и Index Copernicus, журнал включен в Перечень ВАК по трем группам научных специальностей и двум специальностям, цели и задачи журнала успешно выполняются.

2023 год открывает новые возможности и ставит новые задачи. Следующей важнейшей задачей для журнала становится работа над включением в Перечень ВАК Российской Федерации по специальностям новой Номенклатуры в соответствии с новыми требованиями.

От имени органов управления редакции выражаю искреннюю благодарность членам редколлегии и нашим авторам за высокий профессионализм, а также за активное, длительное и плодотворное сотрудничество!

Ответственный секретарь журнала (2018-2021),  
заместитель главного редактора Третьяков И.А.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Редакция журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимает к рассмотрению на предмет опубликования в журнале ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные статьи по тематике журнала.
2. Авторы статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за факт их публикации. Допускается публикация не более двух статей от одного автора в одном номере и наличие не более пяти авторов одной статьи. Один из авторов должен иметь ученую степень. Гонорар не выплачивается и плата за публикацию статей не взимается.
3. Авторами представляется рукопись статьи в одном экземпляре (на русском или английском языке), 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 источников, сведения об авторах. Вместе с рукописью на адрес электронной почты [vestnik.donnu.g@donnu.ru](mailto:vestnik.donnu.g@donnu.ru) высыпается электронный вариант с полным текстом статьи в формате doc или docx. При отсутствии возможности предоставления в редколлегию рукописи, на электронную почту редакции высыпается полный текст статьи в формате pdf. Статьи, не соответствующие Правилам для авторов или тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Все статьи, принятые к рассмотрению, подвергаются рецензированию и в случае положительной рецензии – научному и техническому редактированию.
4. Решение о публикации, публикации после доработки/переработки или отклонении статьи принимается редакционной коллегией журнала. Если статья рекомендуется к публикации после небольшой авторской доработки, редакция направляет авторам статьи замечания (без указания рецензента). Статья, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в максимально короткий срок. К доработанной статье необходимо предоставить письмо от авторов, содержащее ответы на все замечания и поясняющие все изменения, сделанные в статье. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензию (без указания рецензента) или выдержки из нее, либо аргументированное письмо редактора. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения.

### 5. 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.
- **Межстрочный 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, список источников, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
- **Подрисуточные подписи, заглавие и содержание таблиц:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по центру, без автоматической расстановки переносов.

6. 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 **фамилия(и) и инициалы 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. Блок аннотации и ключевые слова рекомендуется отделять от основного текста 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 ИСТОЧНИКОВ** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку с абзацным выступом 0,5 см приводится нумерованный перечень используемых источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Ссылка на источник приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо наличие источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** надпись «*Поступила в редакцию xx.xx.20xx г., рекомендована к печати xx.xx.20xx г.*» размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, **фамилия(и) и инициалы автора(ов)**, аннотация и ключевые слова (*Keywords*) на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языках):
  - **Фамилия, имя, отчество;**
  - ученая степень, ученое звание, должность, с указанием организации (в соответствии с уставом), которую представляет автор;
  - страна, город;
  - адрес электронной почты.

7. Образец оформления статьи:

УДК 65.011.56:681.5.08

## ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ПАВ ПОСРЕДСТВОМ МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2023 Третьяков И.А., Данилов В.В.

В данной работе продолжено описание элементов специализированных автоматизированных систем научных исследований параметров поверхностных акустических волн, на основе оптического зондирования, в частности, метода стационарной опорной решетки и метода «ножевой диафрагмы».

**Ключевые слова:** автоматизированная система, поверхностные акустические волны, дифракция.

**Введение.** Оптические методы измерения параметров ПАВ [1-3] ...

**Постановка задачи.** По многочисленности обрабатываемой информации [4] ...

**Метод оптического зондирования.** При зондировании поверхностных ...

**Выводы.** Таким образом, показаны элементы автоматизированных ...

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яновский, А. В. Структуры автоматизированных систем научных исследований параметров поверхностных акустических волн / А. В. Яновский, И. А. Третьяков, В. В. Данилов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 4. – С. 46-53. – EDN FOBKIO.
2. Автоматизированные системы научных исследований. – URL: <https://studbooks.net/1386372/> /avtomatizirovannye\_sistemy\_upravleniya (дата обращения: 20.02.2023).

*Поступила в редакцию xx.xx.2023 г., рекомендована к печати xx.xx.2023 г.*

## ELEMENTS OF AUTOMATED PSAW MEASUREMENT SYSTEMS BY MEANS OF OPTICAL SENSING METHODS

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

In this paper, the description of the elements of specialized automated systems for scientific research of the parameters of surface acoustic waves, based on optical sensing, in particular, the method of stationary support grating and the method of "knife diaphragm", is continued.

**Keywords:** automated system, surface acoustic waves, diffraction.

### Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», Российской Федерации, ДНР, г. Донецк.  
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

### Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean for Research, Associate Professor at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, Russian Federation, DPR, Donetsk.

### Данилов Владимир Васильевич

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

### Danilov Vladimir Vasilevich

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

8. 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. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись (не совмещенную с рисунком) в формате: «Рис. №. Название». Каждая таблица должна иметь заглавие 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, допускается применение букв при нумерации рисунков, состоящих из нескольких частей. Сканированные рисунки не допускаются. Образец оформления рисунка и таблицы:

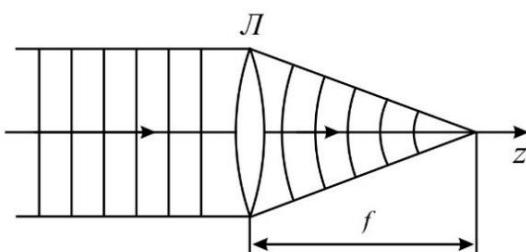


Рис. 1. Действие линзы на плоскую волну

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

Элемент	Номинал	Единица измерения
C <sub>out</sub>	25	пФ
C <sub>1</sub>	10	нФ
C <sub>2</sub>	100	мкФ
L <sub>1</sub>	150	мкГн
L <sub>2</sub>	460	нГн
L <sub>3</sub>	765	нГн
R <sub>1</sub>	0,39	МОм

9. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». После формул ставится тот знак препинания, который необходим исходя из построения фразы. 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. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются только с помощью редакторов формул Microsoft Equation 3.0 или MathType 5.0 и выше с параметрами:

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

Образец оформления формулы:

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

10. Материалы представляются по адресу:

283001, Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13, Физико-технический факультет.

**Главный редактор:** Данилов Владимир Васильевич, каб. 203.

**Зам. главного редактора:** Третьяков Игорь Александрович, каб. 210.

**Ответственный секретарь:** Пометун Екатерина Дмитриевна, каб. 001.

**Контактный тел.:** +7 (856) 302 07 81

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

*Научное издание*

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

**– 2023. – № 1.**

Научное и техническое редактирование: И.А. Третьяков, Е.Д. Пометун

---

Адрес редакции:

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,  
283001, Российской Федерации, ДНР, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13.  
Тел.: +7 (856) 302 07 81.  
E-mail: [vestnik.donnu.g@donnu.ru](mailto:vestnik.donnu.g@donnu.ru)  
URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

---

Подписано в печать 31.03.2023 г.  
Формат 60×84/8. Бумага офсетная.  
Печать – цифровая. Усл. печ. л. 11,04.  
Тираж 100 экз. Заказ. №  
Бесплатно.

Издательство ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»  
283001, Российской Федерации, ДНР, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24.  
Тел.: +7 (856) 302 92 27.  
Свидетельство о внесении субъекта издательской деятельности  
в Государственный реестр  
серия ДК № 1854 от 24.06.2004 г.