

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОЛОГОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ВЕСТНИК**  
**ВОЛОГОДСКОГО**  
**ГОСУДАРСТВЕННОГО**  
**УНИВЕРСИТЕТА**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 2018 г.

**№ 2 (16) / 2022**

СЕРИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ВОЛОГДА  
2022

№ 2 (16) / 2022 / СЕНТЯБРЬ. Выходит 4 раза в год.

Научный журнал «Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки» включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) с 2018 г.

Полнотекстовые версии выпусков научного журнала размещены в свободном доступе на сайте Научной электронной библиотеки ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru))

**Серия:** Технические науки

**Специальности:** 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения; 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение; 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей; 2.1.9. Строительная механика; 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации; 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами; 2.3.4. Управление в организационных системах; 2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования; 2.5.6. Технология машиностроения; 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы.

**Учредитель и издатель:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет»

**Свидетельство о регистрации СМИ:** ПИ № ФС77-75456 от 05 апреля 2019 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

#### **Главный редактор**

*А.А. Кочкин*, доктор технических наук, зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства, доцент Вологодского государственного университета

#### **Заместители главного редактора:**

*А.Е. Немировский*, доктор технических наук, профессор Вологодского государственного университета,

*А.Н. Швецов*, доктор технических наук, профессор Вологодского государственного университета

#### **Секретарь**

*В.А. Раков*, кандидат технических наук, доцент Вологодского государственного университета

#### **Члены редколлегии:**

*П.Ю. Бочкарев*, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ,  
*В.Г. Гагарин*, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН,  
проф. НИИСФ РААСН,  
*В.А. Горбунов*, д-р физ.-мат. наук, проф. ВоГУ,  
*В.П. Гусев*, д-р техн. наук, зав. лаб. НИИСФ РААСН,  
*Н.М. Дементьев*, канд. техн. наук, доц. ВоГУ,  
*Р.Ю. Добрецов*, д-р техн. наук, проф. ИММиТ (СПб),  
*И.В. Зефирова*, канд. техн. наук, доц. ВГМХА  
им. Н.В. Верещагина,  
*А.Ф. Зубков*, д-р техн. наук, проф. ТГТУ,  
*А.Л. Кузьминов*, д-р техн. наук, проф. ЧГУ,  
*А.Г. Кочев*, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН,  
проф. ННГАСУ,  
*Л.Н. Кондратьева*, д-р техн. наук, проф. СПбГАСУ,  
*В.И. Леденев*, д-р техн. наук, проф. ТГТУ,  
*С.В. Лукин*, д-р техн. наук, проф. ЧГУ,  
*О.В. Мкртычев*, д-р техн. наук, проф. НИУ МГСУ,

*С.Н. Овсянников*, д-р техн. наук, проф. ТГАСУ,  
*В.П. Подольский*, заслуженный деятель науки РФ,  
д-р техн. наук, проф. ВГТУ,  
*А.М. Полянский*, канд. техн. наук, доц. ВоГУ,  
*В.А. Пиеничкина*, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ,  
*В.И. Римшин*, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН,  
проф. НИИСФ РААСН,  
*А.С. Степанов*, канд. техн. наук, доц. ВоГУ,  
*А.А. Сукончиков*, канд. техн. наук, доц. ВоГУ,  
*Н.Н. Трушин*, д-р техн. наук, проф. ТулГУ,  
*В.Д. Чертовской*, д-р техн. наук, проф. ГУМРФ  
им. адм. С.О. Макарова,  
*Д.С. Шишигин*, канд. техн. наук, ВоГУ,  
*С.Л. Шишигин*, д-р техн. наук, проф. ВоГУ,  
*В.А. Шорин*, д-р хим. наук, проф. ВоГУ,  
*И.Л. Шубин*, д-р техн. наук, чл.-корр. РААСН,  
директор НИИСФ РААСН

**Переводчик** – *Т.В. Михайлюк*, кандидат педагогических наук, доцент Вологодского государственного университета

**Редакторы** – *А.И. Ланькова*, *А.П. Митракова*, *Н.Н. Постникова*

**Оригинал-макет** – *Н.В. Подхомутова*

**Адрес редакции:** e-mail: [vestniktech@vogu35.ru](mailto:vestniktech@vogu35.ru); <http://vestnik.vogu35.ru>

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION  
FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION  
VOLOGDA STATE UNIVERSITY

# **BULLETIN OF VOLOGDA STATE UNIVERSITY**

SCIENTIFIC JOURNAL

First published in 2018

**No. 2 (16) / 2022**

SERIES: TECHNICAL SCIENCES

VOLOGDA  
2022

No. 2 (16) / 2022 / SEPTEMBER. It is issued 4 times a year.

Scientific Journal "Bulletin of Vologda State University. Series: Technical sciences" has been included into Russian Science Citation Index (RSCI) since 2018.

Full-text versions of the scholarly journal issues are freely available on the website of Scientific Electronic Library ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru))

**Series:** Technical Sciences

**Academic areas:** 2.1.1. Building constructions, buildings and structures; 2.1.3. Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting; 2.1.8. Design and construction of roads, subways, airfields, bridges and transport tunnels; 2.1.9. Structural mechanics; 2.3.1. System analysis, management and information processing; 2.3.3. Automation and control of technological processes and productions; 2.3.4. Management in organizational systems; 2.3.7. Computer modeling and design automation; 2.5.6. Mechanical engineering technology; 2.5.11. Surface transport and technological means and complexes.

**Founder and publisher:** Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Vologda State University

**Mass Media Registration Certificate:** PI No. FS77-75456 dated of April 05, 2019 was issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Communications (Roskomnadzor)

**Editor-in-Chief**

*A.A. Kochkin*, Doctor of Engineering, Head of the Department of Industrial and Civil Construction, Associate Professor of Vologda State University

**Assistant editors:**

*A.N. Shvetsov*, Doctor of Engineering, Professor of Vologda State University

*A.E. Nemirovsky*, Doctor of Engineering, Professor of Vologda State University

**Secretary**

*V.A. Rakov*, Candidate of Engineering, Associate Professor of Vologda State University

**Members of the Editorial Board:**

*P.Yu. Bochkaryov*, Doctor of Technical Sciences, Prof. of VolgSTU,

*V.G. Gagarin*, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAACS, prof. of NIISPh of RAACS,

*V.A. Gorbunov*, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Prof. of VSU,

*V.P. Gusev*, Doctor of Technical Sciences, Head of laboratory of NIISPh of RAACS,

*N.M. Dementyev*, Ph.D in Technical Sciences, Associate Prof. of VSU,

*R.Yu. Dobretsov*, Doctor of Technical Sciences, Prof. of IMMiT (St. Petersburg),

*I.V. Zefirov*, Ph.D in Technical Sciences, Associate prof. of VSDA named after N.V. Vereshchagin,

*A.F. Zubkov*, Doctor of Technical Sciences, Prof. of TSTU,

*A.L. Kuzminov*, Doctor of Technical Sciences, Prof. of CHSU,

*A.G. Kochev*, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAACS, Prof. of NNGASU,

*L.N. Kondratiev*, Doctor of Technical Sciences, Prof. of SPbSUACE,

*V.I. Ledenyov*, Doctor of Technical Sciences, Prof. of TSTU,

*S.V. Lukin*, Doctor of Technical Sciences, Prof. of CHSU,

*O.V. Mkrtychev*, Doctor of Technical Sciences, Prof. of NRU MGSU,

*S.N. Ovsyannikov*, Doctor of Technical Sciences, Prof. of TSUAB,

*V.P. Podolsky*, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Prof. of VSTU,

*A.M. Polyansky*, Ph.D in Technical Sciences, Associate prof. of VSU,

*V.A. Pshenichkina*, Doctor of Technical Sciences, prof. of VolgSTU,

*V.I. Rimshin*, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAACS, Prof. of NIISPh RAACS,

*A.S. Stepanov*, Ph.D in Technical Sciences, Associate prof. of VSU,

*A.A. Sukonshchikov*, Ph.D in Technical Sciences, Associate prof. of VSU,

*N.N. Trushin*, Doctor of Technical Sciences, Prof. of TuLSU,

*V.D. Chertovskaya*, Doctor of Technical Sciences, Prof. of Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,

*D.S. Shishigin*, Ph.D in Technical Sciences, Prof. of VSU,

*S.L. Shishigin*, Doctor of Technical Sciences, Prof. of VSU,

*V.A. Shorin*, Doctor of Chemical Sciences, Prof. of VSU,

*I.L. Shubin*, Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of RAACS, Director of NIISPh of RAACS

**Translator** – T.V. Mikhailuyuk, Candidate of Pedagogy, Associate Professor of Vologda State University

**Editors** – A.I. Lankova, A.P. Mitrakova, N.N. Postnikova

**Original layout** – N.V. Podhomutova

**Editorial office:** e-mail: [vestniktech@vogu35.ru](mailto:vestniktech@vogu35.ru); <http://vestnik.vogu35.ru>

ISSN 2658-3399

© FSBEI of HE Vologda State University, 2022

## Содержание

### СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Кривулина Э.Ф., Шляхов С.М.</i> ЗАДАЧА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПО УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОГОЙ СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЫ ИЗ БЕТОННЫХ БАЛОК ПРИ СЕРНОМ ИХ УПРОЧНЕНИИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ СТАЦИОНАРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ .....	7
<i>Огородов Л.И., Шапкина В.А.</i> МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ ПОСЛЕ МНОГОЛЕТНЕГО ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ.....	11
<i>Синицын А.А., Соболев Д.А.</i> ОЦЕНКА КАЧЕСТВА НАРУЖНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЗДАНИЯ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	18
<i>Соловьев С.А., Шевцов Л.С., Соловьева А.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АРБОЛИТА И ДРЕВЕСНО-ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ КАК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	21
<i>Шорин В.А., Вельсовский А.Ю.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННЫХ СВЯЗЕЙ В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОКРЫТИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ .....	25

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Домаков А.И., Кузьмин А.Г., Турыгин С.В., Умаров М.Ф.</i> РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В МЕМБРАНЕ КЛЕТКИ.....	30
<i>Полянский А.М.</i> УПРАВЛЕНИЕ ПОРТФЕЛЕМ ПРОГРАММНЫХ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА.....	35
<i>Суконщиков А.А., Круглов В.В.</i> ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПАДАЮЩИХ ТЕНЕЙ В 3D-ГРАФИКЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПО ТЕХНОЛОГИИ SHADOW MAPPING С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ DIRECTX 11.....	40

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Баев А.С.</i> ОСОБЕННОСТИ ПРИВОДА АЗИМУТАЛЬНЫХ ПРОПУЛЬСИВНЫХ СИСТЕМ .....	44
<i>Булавин В.Ф., Булавина Т.Г.</i> САД-АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НА МАЛЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ .....	48
<i>Бормосов Н.А., Белянина А.Ю., Кочкарева Т.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОБЪЕКТОВ С ГУММИРОВАННЫМ ПОКРЫТИЕМ .....	51
<i>Востров А.В., Ботьков А.О., Губин В.А., Галочкин В.А.</i> ИЗМЕНЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ПЕРЕКРЕСТКЕ УЛИЦ КОНЕВА И МОЖАЙСКОГО В Г. ВОЛОГДЕ ПОСЛЕ ОРГАНИЗАЦИИ КОЛЬЦЕВОГО ПЕРЕСЕЧЕНИЯ .....	57
<i>Востров А.В., Ботьков А.О.</i> АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ И ПРЕДЕЛЬНОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ НА КОЛЬЦЕВОМ ПЕРЕСЕЧЕНИИ УЛИЦ КОНЕВА И МОЖАЙСКОГО В Г. ВОЛОГДЕ .....	61
<i>Попов И.П.</i> ВЛИЯНИЕ НАКЛОНА РЕШЕТ СОРТИРОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНУЮ МОЩНОСТЬ.....	65
<i>Саразов Р.С.</i> РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	68
<i>Яняк С.В., Комиссарова И.И.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА И АНАЛИЗ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА СО СВЯЗКОЙ ИЗ СПЕЦСТАЛИ.....	73
<i>Сведения об авторах</i> .....	81

## CONTENTS

### CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Krivulina E.F., Shlyakhov S.M.</i> PROBLEM OF RELIABILITY EVALUATION ON THE STABILITY OF CONCRETE BEAMS SLOW ROD SYSTEM UNDER THEIR SULFUR HARDENING ON THE BASIS OF STATIONARY RANDOM PROCESSES THEORY.....	7
<i>Ogorodov L.I., Shapkina V.A.</i> MECHANICAL CHARACTERISTICS OF POLYMER-BASED COMPOSITE MATERIALS AFTER LONG-TERM NATURAL AGING.....	11
<i>Sinitsyn A.A., Sobolev D.A.</i> QUALITY ASSESSMENT OF EXTERNAL CONSTRUCTION FENCES WITH THE USE OF THERMAL NON-DESTRUCTIVE TESTING OF THE HEAT SUPPLY COMPANY BUILDING.....	18
<i>Solovyov S.A., Shevtsov L.S., Solovyova A.A.</i> RESEARCH OF THE ORIGIN OF PAPERCRETE AND WOOD-CEMENT COMPOSITES AS STRUCTURAL MATERIALS .....	21
<i>Shorin V.A., Velsovsky A.Y.</i> RESEARCH OF ADHESIVE BONDS IN COMPOSITE MATERIAL FOR ROAD SURFACE TREATMENT TECHNOLOGY .....	25

### INFORMATION TECHNOLOGY

<i>Domakov A.I., Kuzmin A.G., Turygin S.V., Umarov M.F.</i> DEVELOPMENT OF A MODEL TO DESCRIBE THE PROCESSES OCCURRING IN THE CELL MEMBRANE .....	30
<i>Poliansky A.M.</i> MANAGING A PORTFOLIO OF SOFTWARE PROJECTS BASED ON AN AGENT-BASED APPROACH .....	35
<i>Sukonschikov A.A., Kruglov V.V.</i> RENDERING OF SHADOWS IN REALTIME 3D-GRAPHICS WITH DI-RECTX 11 USING THE SHADOW MAPPING TECHNIQUE.....	40

### MECHANICAL ENGINEERING

<i>Bayov A.S.</i> AZIMUTH PROPULSION SYSTEMS DRIVE FEATURES.....	44
<i>Bulavin V.F., Bulavina T.G.</i> CAD DESIGN AUTOMATION IN SMALL ENTERPRISES.....	48
<i>Bormosov N.A., Belyanina A.Yu., Kochkareva T.A.</i> STUDY OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN GUMMED COATING OBJECTS MANUFACTURE .....	51
<i>Vostrov A.V., Botkov A.O., Gubin V.A., Galochkin V.A.</i> TRAFFIC FLOWS CHANGES AT THE INTERSECTION OF KONEVA AND MOZHAISKY STREETS IN VOLOGDA AFTER ROUNDABOUT ORGANIZATION.....	57
<i>Vostrov A.V., Botkov A.O.</i> ANALYSIS OF TRAFFIC FLOWS AND MAXIMUM THROUGHPUT CAPACITY AT THE ROUNDABOUT OF KONEVA AND MOZHAISKY STREETS IN VOLOGDA ....	61
<i>Popov I.P.</i> SORTING MACHINE SIEVE TILT INFLUENCE ON PRODUCTION CAPACITY.....	65
<i>Sarazov R.S.</i> DEVELOPMENT OF AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR METALWORKING EQUIPMENT RESTORATION .....	68
<i>Yaniak S.V., Komissarova I.I.</i> EXPERIMENTAL EVALUATION AND ANALYSIS OF PROPERTIES OF HARD ALLOYS BASED ON SPECIAL STEEL BOND TITANIUM CARBIDE .....	73
<i>Information about the authors</i> .....	84

УДК 539.3



Э.Ф. Кривулина, С.М. Шляхов  
Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.

**ЗАДАЧА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПО УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОГОЙ СТЕРЖНЕВОЙ СИСТЕМЫ  
ИЗ БЕТОННЫХ БАЛОК ПРИ СЕРНОМ ИХ УПРОЧНЕНИИ  
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ СТАЦИОНАРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ**

В статье представлено решение задачи об оценке влияния серного упрочнения железобетонных балок на устойчивость пологой стержневой системы. Нагрузка на систему случайна. Приведен пример расчета и дан сравнительный анализ несущей способности упругой системы при насыщении балок серой и без нее.

Пористость, серобетон, надежность.

Известно, что бетон является пористым материалом, несущая способность которого существенно зависит от уровня пористости (P). В целях повышения прочностных характеристик бетона используется сера. В статье [5] представлено решение задачи диффузии серы в поры бетона и найдены значения модуля Юнга серобетонной смеси на основе теории смесей композитов [4, 5].

Выяснено, что модуль Юнга серобетонной смеси мало отличается от чистого бетона. Обусловлено это близостью упругих свойств бетона и кристаллической серы. Сказанное не относится к пределу прочности смеси при сжатии, который существенно зависит от содержания серы. В частности, для случая пористости P = 8 % (тяжелый бетон). Эксперимент дает  $R_{B1} = 21,5$  МПа для чистого бетона и  $R_{B2} = 42$  МПа для бетона, насыщенного серой [1]. Расчетная схема конструкции отражена на рисунке 1.

Симметричная стержневая система состоит из n равных шарнирно скрепленных стержней. Подъем стержней (Y) мал по сравнению с их длиной (l). Конструкция нагружена в общем узле силой (Q). Нагрузка

(Q) являет собой случайный нормальный стационарный процесс. Задана нормативная надежность конструкции по устойчивости ( $H_{норм}$ ) и время эксплуатации системы (T).

В процессе нагружения системы стержни испытывают сжимающие их усилия и по достижении критической нагрузки ( $Q = Q_{кр}$ ) вся система претерпевает просок в обратную сторону. В течение всего времени эксплуатации (T) должны соблюдаться условия надежности:

$$Q < Q_{кр}, H \geq H_{норм}. \quad (1)$$

Для указанного процесса нагружения надежность по устойчивости примет вид [2]

$$H = \exp\left(-\frac{T\sigma_Q}{2\pi\sigma_Q} \exp\left(-\frac{(Q_{кр} - m_Q)^2}{2\sigma_Q^2}\right)\right). \quad (2)$$

На основе экспериментальных данных корреляционная функция может быть задана формулой

$$K_Q(\tau) = \sigma_Q^2 e^{-\alpha_0|\tau|} \left(\cos\beta_0\tau + \frac{\alpha_0}{\beta_0} \sin\beta_0|\tau|\right), \quad (3)$$

где  $\alpha_0, \beta_0$  – эмпирические коэффициенты.

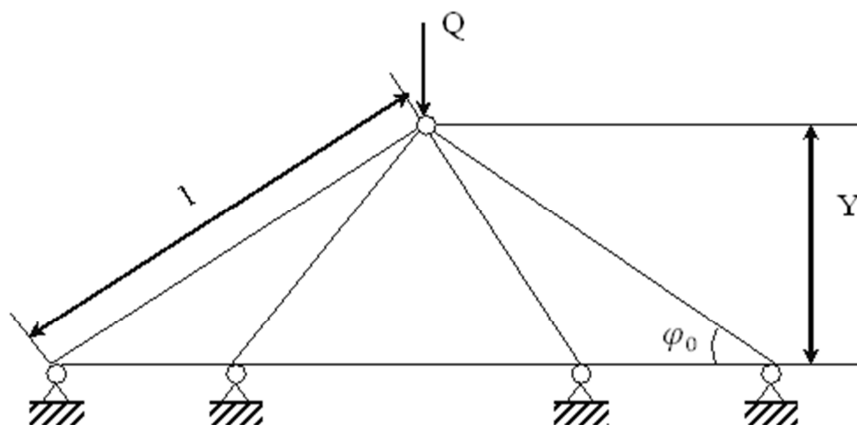


Рис. 1. Расчетная схема конструкции

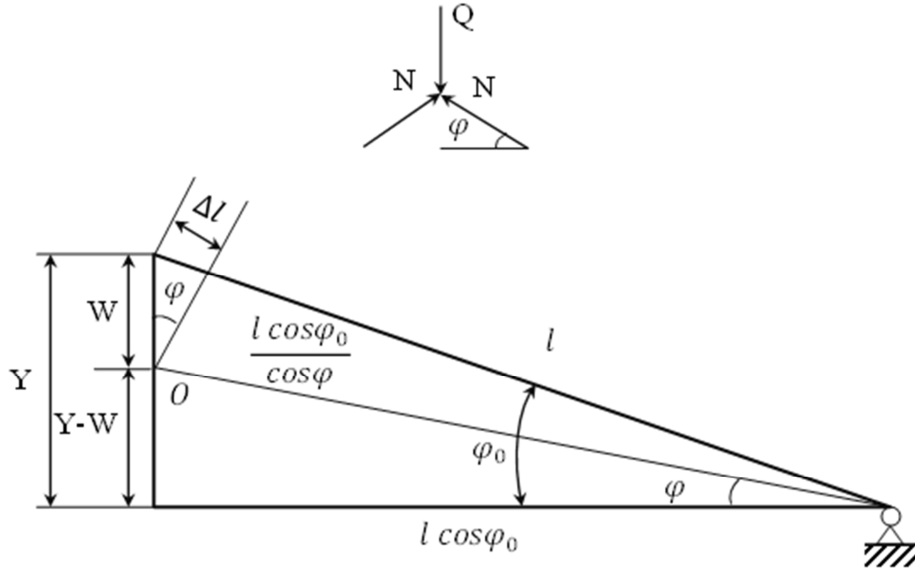


Рис. 2. Схема деформирования стержней

Согласно (3) формула надежности (2) приобретет вид

$$H = \exp\left(-\frac{T\sqrt{\alpha_0^2 + \beta_0^2}}{2\pi} \exp\left(-\frac{(Q_{кр} - m_Q)^2}{2\sigma_Q^2}\right)\right). \quad (4)$$

Для определения характера деформирования системы рассмотрим один из стержней до и после нагружения [3] (рис. 2).

Обозначим через  $\varphi$  угол, который составляет стержень с горизонтальной плоскостью. После деформации высота узловой точки O над горизонтом будет  $Y - W$ . Соответственно, угол наклона стержня к горизонту при малых перемещениях определится отношением  $\sin\varphi_0 \approx \varphi_0 = \frac{Y}{l}$ . Связь нагрузки ( $Q$ ) с усилиями в стержнях ( $N$ ) будет следующей:

$$Q = nN \frac{Y - W}{l}. \quad (5)$$

Из геометрии деформирования видим, что  $\Delta l = l\left(1 - \frac{\cos\varphi_0}{\cos\varphi}\right)$ . Отсюда в силу малости углов  $\varphi$  и  $\varphi_0$  следует:

$$\Delta l = \frac{l}{2}(\varphi_0^2 - \varphi^2). \quad (6)$$

Поскольку  $\varphi_0 = \frac{Y}{l}$ ,  $\varphi = \frac{Y-W}{l}$ , то на основе (6) получим:

$$\Delta l = \frac{W}{l}\left(Y - \frac{W}{2}\right). \quad (7)$$

Выразим связь усилия в стержне  $N$  с перемещением  $\Delta l$ , используя закон Гука:

$$N = \frac{F_* \Delta l}{l}. \quad (8)$$

Здесь  $F_*$  – упруго геометрический фактор жесткости при растяжении – сжатии.

Полагаем, что пористость распределена по сечению бруса равномерно. Рабочая площадь поперечного сечения будет равна

$$A = A_0(1 - P). \quad (9)$$

Здесь  $A_0$  – геометрическая площадь условно сплошного сечения.

Вводится также гипотеза, что арматура работает только на растяжение, а бетон – только на сжатие.

В нашей задаче стержни только сжимаются, следовательно, арматура роли не играет.

Поскольку насыщение пор бетона серой практически не влияет на его модуль Юнга ( $E$ ), то в дальнейшем будем считать геометрический фактор жесткости стержня зависящим только от реальной площади сечения.

Для сечения без серы имеем

$$F_* = EA_0(1 - P). \quad (10)$$

Для сечения, насыщенного серой, имеем

$$F_* = F_{сер} = EA_0.$$

Подставляя (7) в (8), определим сжимающее усилие в стержне:

$$N = \frac{F_*}{l^2} W \left(Y - \frac{W}{2}\right). \quad (11)$$

На основании (11) из условия (5) получаем

$$Q = \frac{nF_*}{l^3} W(Y - W) \left(Y - \frac{W}{2}\right). \quad (12)$$

Полученную зависимость (12) представим в безразмерной форме:

$$\frac{Ql^3}{nF_* Y^3} = \frac{W}{Y} \left(1 - \frac{W}{Y}\right) \left(1 - \frac{W}{2Y}\right). \quad (13)$$

Графически функция (13) представлена на рисунке 3.

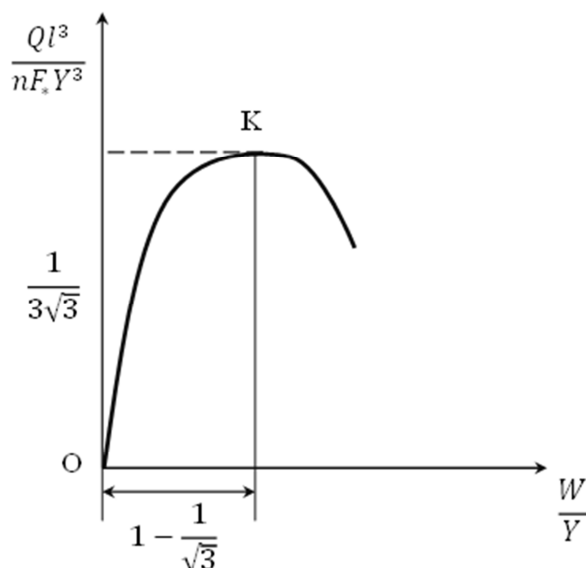


Рис. 3. Графическое представление функции (13)

Точка К на рисунке 3 соответствует первому экстремуму, дающему минимальное критическое усилие  $Q_{кр}$ , при котором система теряет устойчивость.

В качестве иллюстративного примера рассмотрим систему из трех железобетонных стержней со следующими геометрическими параметрами: поперечное сечение – квадрат со стороной  $a = 5 \cdot 10^{-2}$  м, длина стержня  $l = 3$  м, стрела подъема  $Y = 0,2$  м. Параметры случайного процесса: заданная надежность  $H_{норм} = 0,995$ , срок службы  $T = 10$  лет  $= 315 \cdot 10^6$  с,  $\alpha_0 = 0,3 \frac{1}{с}$ ,  $\beta_0 = 0,4 \frac{1}{с}$ . Пористость бетона  $P = 0,08$  (8%). Модуль Юнга бетона  $E_{бет} = 20 \cdot 10^3$  МПа. Рабочая нагрузка  $Q = 4,6$  кН,  $\sigma_Q = 0,46$  кН.

Рассмотрим сначала брус без серного упрочнения:

$$Q_{кр1} = \frac{EFY^3}{\sqrt{3}l^3} = \frac{Ea^2(1-P)Y^3}{\sqrt{3}l^3} = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot (5 \cdot 10^{-2})^2 (1-0,08) 0,8^3}{\sqrt{3} \cdot 3^3} = 7,88 \cdot 10^{-3} \text{ МН} = 7,88 \text{ кН}.$$

Определим детерминистический коэффициент запаса устойчивости:  $n_{y1} = \frac{Q_{кр1}}{Q} = \frac{7,88}{4,6} = 1,71$ .

Определим надежность системы по устойчивости по формуле (4):

$$H_1 = \exp\left(-\frac{315 \cdot 10^6 \cdot 0,5}{2 \cdot 3,14} \exp\left(-\frac{(7,88 - 4,6)^2}{2 \cdot 0,46^2}\right)\right) = 1 > H_{норм}.$$

Рассмотрим брус с серным упрочнением:

$$Q_{кр2} = \frac{F_*Y^3}{\sqrt{3}l^3} = \frac{Ea^2Y^3}{\sqrt{3}l^3} = \frac{20 \cdot 10^3 \cdot (5 \cdot 10^{-2})^2 0,2^3}{\sqrt{3} \cdot 3^3} = 8,56 \cdot 10^{-3} \text{ МН} = 8,56 \text{ кН}.$$

Детерминистический коэффициент запаса устойчивости равен  $n_{y2} = \frac{Q_{кр2}}{Q} = \frac{8,56}{4,6} = 1,86$ .

Надежность системы по устойчивости остается прежней, равной  $H = 1$ .

Как видим, при серном упрочнении статическая устойчивость системы существенно повышается.

Оценим статическую прочность стержней на сжатие при нагрузке, близкой к критической.

Внутреннее усилие ( $N$ ) в стержне определяется формулой (11) при  $\frac{W}{Y} = 1 - \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,42263$ .

Соответственно получаем  $W = 0,42263 \cdot 0,2 = 0,084526$  м.

Для внутреннего усилия ( $N$ ) будем иметь  $N = \frac{F_*}{l^3} 0,084526 \cdot \left(0,2 - \frac{0,084526}{2}\right) = \frac{F_*}{l^3} 0,013333$ .

Нормальное напряжение в сечении стержня будет равно  $\sigma = \frac{N}{A} = \frac{F_* \cdot 0,013333}{l^3 A}$ .

Для бруса без серы имеем

$$\sigma_1 = \frac{EA_0(1-P)}{l^2 A_0(1-P)} \cdot 0,013333 = \frac{E \cdot 0,013333}{l^3} = 29,6 \text{ МПа}.$$

Полученное напряжение  $\sigma_1 = 29,6 \text{ МПа} > R_{B1} = 21,6 \text{ МПа}$ .

Для бруса с серой имеем  $\sigma_2 = \frac{EA_0}{l^2 A_0} \cdot 0,013333 = \frac{E \cdot 0,013333}{l^3} = 29,6 \text{ МПа}$ .

Полученное напряжение  $\sigma_2 = 29,6 \text{ МПа} < R_{B2} = 42 \text{ МПа}$ .

Как видим, формально напряжение в пористом бруске будет одинаковым при насыщении серой и без нее, но при нагрузке, близкой к критической, статическая прочность серобетона выше. Сказанное подтверждает целесообразность применения насыщения серой пор в бетонных балках.

## Литература

1. Строительство, Специальные цементы : официальный сайт. – URL: [www.stfa.ru/poristost-betona](http://www.stfa.ru/poristost-betona) (дата обращения: 29.08.2022). – Текст : электронный.

2. Арасланов, А. М. Расчет элементов конструкций заданной надежности при случайных воздействиях / А. М. Арасланов. – Москва : Машиностроение, 1987. – 128 с.

3. Пономарев, С. Д. Расчеты на прочность в машиностроении / С. Д. Пономарев. – Москва : Машгиз, 1956. – Т. 1. – 884 с.

4. Шермергор, Т. Д. Теория упругости микroneоднородных сред / Т. Д. Шермергор. – Москва : Наука, 1977. – 400 с.

5. Шляхов, С. М. Об оценке упругих характеристик бетонной балки при поверхностном упрочнении ее серой / С. М. Шляхов, М. М. Егоров // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2019. – № 2 (35).

*E.F. Krivulina, S.M. Shlyakhov*

*Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin*

**PROBLEM OF RELIABILITY EVALUATION ON STABILITY OF CONCRETE BEAMS SLOW ROD SYSTEM UNDER THEIR SULFUR HARDENING ON THE BASIS OF STATIONARY RANDOM PROCESSES THEORY**

The article presents a solution to the problem of assessing the effect of sulfur hardening of reinforced concrete beams on the stability of a shallow bar system. The load on the system is random. An example of calculation is given and a comparative analysis of the bearing capacity of an elastic system with and without saturation of beams with sulfur is given.

Porosity, sulfur concrete, reliability.



*Л.И. Огородов<sup>1</sup>, В.А. Шапкина<sup>2</sup>*  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
<sup>2</sup>Вологодский государственный университет

## МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ ПОСЛЕ МНОГОЛЕТНЕГО ЕСТЕСТВЕННОГО СТАРЕНИЯ

Представлены механические характеристики при растяжении и сжатии двух композиционных материалов на основе фенолформальдегидной смолы с дисперсным армированием древесной мукой и каолином после многолетнего (до 48 лет) естественного старения образцов. Сопоставляются результаты испытаний с данными аналогичных опытов на образцах композитов в состоянии поставки и после старения 18–19 лет.

Композиты, полимерная основа, дисперсные наполнители, многолетнее старение, механические характеристики, растяжение, сжатие.

При переработке, эксплуатации и хранении полимерные композиционные материалы подвергаются действию многочисленных физических и химических факторов. Это создает условия для инициирования и развития в них химических и физических превращений, которые влияют на механические характеристики материалов. В работе [1] выявлено неоднозначное влияние длительности старения на кратковременное и длительное сопротивление полимерных и полимерных композиционных материалов, что необходимо учитывать при оценке сопротивления конструктивных элементов. Исследования деформационных и прочностных свойств полимерных и полимерных композиционных материалов были продолжены в работах [2, 3, 5].

В настоящей работе изложены результаты исследования кратковременного и длительного сопротивления композитов К-211-2 и К-18-36 на основе фенолформальдегидной смолы с дисперсным армированием древесной мукой и каолином соответственно после многолетнего (до 48 лет) естественного старения образцов материалов.

Для проведения экспериментов использовались образцы композитов К-211-2 и К-18-36, прошедшие многолетнее (до 48 лет) естественное старение.

Полученные данные помогут скорректировать прогнозирование изменения механических свойств полимерных композиционных материалов в условиях длительного старения.

**Цели работы:** получить экспериментальные результаты испытаний на растяжение и сжатие при нормальных и повышенных температурах композиционных материалов на полимерной основе с дисперсным наполнением частицами разной природы К-211-2 и К-18-36, образцы которых прошли многолетнее (47 и 48 лет) естественное старение (без доступа солнечного света) на кратковременную прочность в широком диапазоне скоростей деформирования и на длительную прочность; сопоставить результаты с данными испытаний образцов этих композитов в со-

стоянии поставки и после 18 лет естественного старения.

### **Задачи работы:**

- дать заключение по влиянию времени длительного естественного старения на механические характеристики исследуемых композиционных материалов при растяжении и при сжатии;

- выделить особенности деформирования и разрушения композиционных материалов с разными дисперсными наполнителями при испытаниях с заданными скоростями деформирования и температурами;

- оценить влияние на механические характеристики скорости деформирования и температуры опытов;

- сравнить результаты испытания длительной прочности композитов и дать заключение о возможности определения поврежденности композитов по величине предельных напряжений при кратковременной догрузке после предварительного длительного нагружения.

Композиционные материалы К-211-2 и К-18-36 получены на основе фенолформальдегидной смолы с дисперсным армированием древесной мукой и каолином соответственно. Степень наполнения композитов составляла 30...35 %. Образцы материалов проходили естественное старение в условиях отапливаемого складского помещения (температура в пределах 18...25 °С при влажности не более 50 %) в течение 47 и 48 лет. Опыты на растяжение выполнялись на плоских образцах с длиной рабочей части 100 мм, шириной 25,4 мм и толщиной 0,8...1,4 мм. Образцы на сжатие были выполнены в виде кубов со сторонами 8×8×8 мм.

Испытания на растяжение и сжатие композиционных материалов при нормальной и повышенной температуре проводили на испытательных машинах INSTRON 5966 и INSTRON 8001. Установки обеспечивают нагружение образцов с заданной неизменной скоростью перемещения захвата и измерение нагрузки с низкой погрешностью (не более 1 % измеряемой

величины). Шероховатость рабочей поверхности площадок машины INSTRON 8001 соответствуют  $R_A \leq 0,32$  мкм по ГОСТ 2789-73. Нижняя площадка машины снабжена шарнирной опорой. Испытания при повышенных температурах проводили с установленной термической камерой, которая обеспечивает равномерный прогрев образца до заданной температуры и поддержание ее на протяжении всего испытания. Проведение испытаний и обработка полученных данных выполнена по ГОСТ 25.602-80 и ГОСТ 11262-80.

Результаты настоящих испытаний сопоставлены с данными аналогичных опытов на образцах композитов в состоянии поставки (до старения) и после старения (18–19 лет).

В таблицах 1–3 представлено сравнение механических характеристик композитов К-211-2 и К-18-36 в различных состояниях (I – состояние поставки, II – после естественного старения 18 лет, III – после старения 47 лет), испытанных на растяжение при различных температурах и скоростях деформирования (V).

Таблица 1

**Механические характеристики композитов в различных условиях**

V, мм/мин	Марка композита	Состояние	Механические характеристики при растяжении								
			20 °С			60 °С			100 °С		
			$\sigma_{ut}$ , МПа	$\varepsilon_{ut}$ , %	Ер, МПа	$\sigma_{ut}$ , МПа	$\varepsilon_{ut}$ , %	Ер, МПа	$\sigma_{ut}$ , МПа	$\varepsilon_{ut}$ , %	Ер, МПа
2	К-211-2	I	41,89	0,6	6860	35,9	0,7	-	29,3	0,3	-
		II	46,06	1,3	4560	22,1	1,4	3100	9,8	2,1	600
		III	44,94	0,9	4840	45,9	1,3	3646	-	-	-
	К-18-36	I	35,90	0,6	5440	30,8	0,6	-	25,4	0,3	-
		II	37,7	1,0	4400	27,8	1,0	2770	11,4	0,9	1280
		III	31,13	0,6	5030	38,5	1,2	3270	-	-	-
20	К-211-2	I	43,70	0,6	7140	41,4	0,8	-	39,9	0,4	-
		II	46,48	0,9	5470	32,2	1,1	2930	12,4	1,3	550
		III	44,90	1,0	4530	45,9	1,3	3650	-	-	-
	К-18-36	I	36,00	0,6	5840	32,7	0,5	-	27,0	0,4	-
		II	37,67	0,6	5060	25,1	1,2	2280	15,2	1,1	1320
		III	38,80	0,8	5030	35,1	0,9	3990	-	-	-
100	К-211-2	I	48,91	0,6	7860	46,1	0,7	-	34,7	0,2	-
		II	35,58	0,9	5450	24,0	0,9	2660	19,3	1,4	1660
		III	42,80	0,9	4650	-	-	-	-	-	-
	К-18-36	I	39,79	0,6	6440	37,8	0,7	-	33,6	0,2	-
		II	28,87	0,5	5340	27,7	1,1	2520	15,1	1,0	1690
		III	25,90	0,5	4300	-	-	-	-	-	-

Таблица 2

**Изменение механических характеристик композитов при растяжении в зависимости от продолжительности естественного старения образцов**

V, мм/мин	Марка композита	Длительность старения	Изменение в % механических характеристик				
			20 °С			60 °С	
			$\sigma_{ut}$	Ер	$\varepsilon_{ut}$	$\sigma_{ut}$	$\varepsilon_{ut}$
2	К-211-2	18 лет	+10	-33,5	+53,8	-38,4	+100,0
		47 лет	+7,3	-29,4	+50,0	+27,8	+87,7
	К-18-36	18 лет	+5,0	-19,1	+66,7	-9,7	+66,7
		47 лет	-13,3	-7,5	0,0	+7,7	+100,0
20	К-211-2	18 лет	+6,4	-23,4	+50,0	-32,2	+37,5
		47 лет	+2,7	-36,6	+66,7	+10,9	+62,5
	К-18-36	18 лет	+4,7	-13,4	0,0	-23,2	+140,0
		47 лет	+7,8	-13,9	+33,3	+7,3	+80,0
100	К-211-2	18 лет	-27,2	-30,7	+50,0	-47,9	+28,6
		47 лет	-12,5	-40,8	+50,0	-	-
	К-18-36	18 лет	-27,4	-18,6	-16,7	-26,7	+57,1
		47 лет	-34,9	-33,2	-16,7	-	-

Изменение механических характеристик композитов в зависимости от скорости деформирования

V, мм/мин	Материал	Состояние материала	Изменение (в %) механических характеристик с увеличением скорости деформирования при температурах					
			20 °С		60 °С		100 °С	
			$\sigma_{ut}$	$E_p$	$\sigma_{ut}$	$E_p$	$\sigma_{ut}$	$E_p$
20	К-211-2	I	+4,3	+4,1	+15,3	-	+36,2	-
		II	+0,9	+20,0	+45,7	-5,5	+26,5	+58,3
		III	~0,0	-6,4	0,0	+1,1	-	-
	К-18-36	I	+0,3	+7,4	+5,8	-	+6,3	-
		II	~0,0	+15,0	+8,9	-17,7	+33,3	+3,1
		III	+24,6	0,0	-8,8	+22	-	-
100	К-211-2	I	+16,8	+14,6	+28,4	-	+18,4	-
		II	-22,8	+19,5	+8,6	-14,2	+96,9	+176,7
		III	-4,8	-3,9	-	-	-	-
	К-18-36	I	+1,8	+18,4	+22,3	-	+33,3	-
		II	-23,4	+21,4	-0,4	-9,0	+32,4	+32,0
		III	-16,8	-14,5	-	-	-	-

Таблица 4

Механические характеристики композита К-18-36 после 18 и 48 лет естественного старения

V, мм/мин	$\sigma_{uc}$		$\epsilon_{uc}$		$E_c$ , МПа		$\epsilon_f$	
	II	III	II	III	II	III	II	III
0,05	137,5	136,2	0,073	0,076	2590	2330	0,020	0,031
0,4	147,4	148,7	0,066	0,081	3660	2540	0,021	0,033
2,0	156,8	156,7	0,072	0,080	2860	2510	0,018	0,028
20,0	162,5	168,6	0,069	0,081	2850	2660	0,012	0,064
60,0	166,1	180,3	0,067	0,090	3200	2620	0,008	0,029
100,0	167,2	184,0	0,056	0,094	4200	2560	0,004	0,055

Предел прочности композитов при растяжении со скоростями деформирования 2 мм/мин и 20 мм/мин в результате длительного естественного старения 18 лет и 47 лет повысился по сравнению с данными испытаний в состоянии поставки (за исключением одной серии испытаний композита К-18-36) в среднем на 6 %, а при растяжении со скоростью деформирования 100 мм/мин снизился в результате старения в среднем на 26 %. Дополнительное старение образцов композитов в течение 29 лет не приводит к значительному изменению предела прочности композитов К-211-2 и К-18-36.

Значения модуля упругости композита К-211-2 при исследованных скоростях деформирования и температуре 20 °С в результате старения снизились на 32 %, композита К-18-36 – на 17 %. Более длительное старение влияет на этот показатель с учетом дисперсии результатов незначительно.

Испытания композитов при температуре 60 °С показали увеличение модуля упругости в результате продления времени старения (на 29 лет) на 33 %.

Предельная деформация при растяжении (при температуре 20 °С) композитов увеличивалась в среднем на 42 % по сравнению с деформациями образцов в состоянии поставки за исключением результата испытаний композита К-18-36 при V=100 мм/мин, где

отмечается снижение деформации на 17 %. В условиях испытания композитов при температуре 60 °С V=2 мм/мин и V=20 мм/мин, аналогичное сравнение показало увеличение на 90 %. Влияние на предельные деформации при растяжении композитов К-211-2 и К-18-36 более длительного, по сравнению с 18 годами, естественного старения образцов менее существенно.

В таблицах 4–9 приводятся результаты испытаний композитов К-211-2 и К-18-36 при сжатии и дается сравнение механических характеристик материалов в зависимости от длительности старения образцов, скорости деформирования и температуры опытов.

Предел прочности образцов композита К-211-2 при сжатии со скоростями деформирования от 0,05 до 100 мм/мин в результате дополнительного времени естественного старения от 18 до 48 лет увеличился в среднем на 12 %, предельные деформации повысились в среднем на 51 %, а модуль упругости при сжатии уменьшился в среднем на 18 %. Для композита К-18-36 эти механические характеристики изменились в среднем на 4 %, 26 % и 20 %. Относительная остаточная деформация при разрушении композитов увеличивалась значительно, достигая увеличения в среднем на 220 %.

Таблица 5

**Механические характеристики композита К-211-2 после 18 и 48 лет естественного старения**

V, мм/мин	$\sigma_{uc}$		$\epsilon_{uc}$		$E_c$ , МПа		$\epsilon_r$	
	II	III	II	III	II	III	II	III
0,05	184,4	175,2	0,158	0,147	2630	2240	0,088	0,100
0,4	191,8	212,0	0,111	0,175	3180	2690	0,041	0,127
2,0	225,2	223,1	0,154	0,185	3200	2690	0,082	0,131
20,0	204,7	225,7	0,127	0,166	3450	2790	0,068	0,099
60,0	216,2	255,5	0,080	0,171	-	2910	-	0,104
100,0	185,9	257,2	0,074	0,142	4020	2950	0,004	0,084

Таблица 6

**Изменение механических характеристик при естественном старении от 18 до 48 лет**

Марка композита	V, мм/мин	Изменение характеристик			
		$\sigma_{uc}$	$\epsilon_{uc}$	$E_c$ , МПа	$\epsilon_r$
К-211-2	0,05	-5	-7	-15	+14
	0,4	+10	+58	-15	+210
	2,0	+1	+20	-16	+60
	20,0	+10	+31	-19	+46
	60,0	+18	+114	-	-
	100,0	+38	+92	-27	+95
К-18-36	0,05	+1	+4	-10	+55
	0,4	+1	+23	-31	+57
	2,0	0	+11	-12	+56
	20,0	+4	+17	-7	+433
	60,0	+8	+34	-18	+262
	100,0	+10	+68	-39	+1275

Таблица 7

**Механические характеристики композитов при повышенных температурах после 48 лет естественного старения**

V, мм/мин	T, °C	К-211-2				К-18-36			
		$\sigma_{uc}$ , МПа	$\epsilon_{uc}$	$E_c$ , МПа	$\epsilon_r$	$\sigma_{uc}$ , МПа	$\epsilon_{uc}$	$E_c$ , МПа	$\epsilon_r$
2	60	192,4	0,123	3040	0,093	116,3	0,059	3050	0,057
	100	128,4	0,219	2300	0,194	91,3	0,062	2620	0,059
20	60	194,7	0,139	3150	0,108	123,5	0,065	3150	0,060
	100	136,7	0,240	2650	0,217	91,2	0,084	2260	0,083
100	60	203,0	0,127	3380	0,082	135,2	0,065	3330	0,061
	100	154,0	0,229	2890	0,203	88,5	0,083	1740	0,079

Таблица 8

**Изменение (в %) механических характеристик композитов с повышением температуры испытаний по сравнению с данными, определенными при температуре 20 °C**

Материалы	V, мм/мин	$\sigma_{uc}$ , МПа		$\epsilon_{uc}$		$E_c$ , МПа		$\epsilon_r$	
		60 °C	100 °C	60 °C	100 °C	60 °C	100 °C	60 °C	100 °C
К-211-2	2	-13,8	-42,4	-33,5	+18,4	+13,0	-14,5	-29,0	+48,1
	20	-13,7	-39,4	-16,3	+44,6	+12,9	-5,0	+9,1	+119,2
	100	-21,1	-49,1	-10,6	+61,3	+14,6	-2,0	-2,4	+141,7
К-18-36	2	-26,2	-42,1	-262,2	-22,5	+21,5	+4,4	+85,7	+110,7
	20	-26,7	-45,9	-19,8	+3,7	+18,4	-15,0	-6,2	+29,7
	100	-26,5	-51,9	-30,8	+11,7	+30,0	-32,0	+10,9	+43,6

Изменение механических характеристик композитов в зависимости от скорости деформирования по сравнению с результатами опытов при скорости 2 мм/мин

T, °C	V, мм/мин	Изменение механических характеристик (%)					
		К-211-2			К-18-36		
		$\sigma_{uc}$	$\epsilon_{uc}$	$E_c$	$\sigma_{uc}$	$\epsilon_{uc}$	$E_c$
20	0,05	-21,5	-20,5	-16,7	-13,1	-5,0	-7,2
	0,4	-5,0	-5,4	0,0	-5,1	+1,2	+1,2
	20	+1,2	-10,3	+3,7	+7,6	+1,2	+6,0
	60	+14,5	-7,6	+8,2	+15,1	+12,5	+4,4
	100	+15,3	-23,2	+9,7	+17,4	+17,5	+2,0
60	20	+1,2	+13,0	+3,6	+6,2	+10,2	+3,2
	100	+5,5	+3,2	+11,2	+16,3	+10,8	+9,2
100	20	+6,5	+9,6	+15,2	-0,1	+35,5	-13,7
	100	+19,9	+11,6	+25,1	-3,1	+33,9	-33,7

Таблица 10

Отношение предельных напряжений при одноосном растяжении  $\sigma_{ит}$  и сжатии  $\sigma_{uc}$  композитов,  $\chi = \sigma_{ит} / \sigma_{uc}$

V, мм/мин	Состояние композита	К-211-2		К-18-36	
		20 °C	60 °C	20 °C	60 °C
2	II	0,24	-	0,20	-
	III	0,20	0,33	0,20	0,24
20	II	0,22	-	0,23	-
	III	0,23	0,37	0,29	0,24
100	II	0,17	-	0,19	-
	III	0,14	-	0,17	-

Таблица 11

Экспериментальные данные длительной прочности композитов

№ п/п	К-18-36		К-211-2	
	$\sigma$ , МПа	$\lg \tau$	$\sigma$ , МПа	$\lg \tau$
1	145,1	2,15	203,6	1,74
2	141,2	2,31	195,9	1,91
3	134,0	3,24	195,9	3,28
4	112,6	6,55	187,5	3,14
5	112,6	6,63	170,2	4,02
6	112,6	6,24	170,2	4,83
7	140,1	2,26	170,2	5,95
8	140,1	2,38	170,2	6,20
9	127,3	3,99	187,5	4,81
10	127,3	4,21	195,9	2,80
11	127,3	4,39	155,5	7,18

Вне зависимости от скорости деформирования при сжатии от 2 до 100 мм/мин повышение температуры испытаний композита К-211-2 от 20 до 60 °C и затем до 100 °C приводит к снижению предела прочности в среднем на 16 % и на 41 %, а композита К-18-36 – на 26 % и на 47 % соответственно. Модуль упругости композитов при температуре 60° C повышался в среднем на 14 % и на 23 %, а при температуре 100 °C снижался относительно результатов при температуре 20 °C на 7 % и на 14 %. Отмечено снижение предельных деформаций в опытах при 60 °C и повышение их в опытах при 100 °C.

При температуре опытов 40 °C и скорости деформирования 2 мм/мин предел прочности при сжатии композита К-211-2 составил 207,8 МПа, а композита К-18-36 – 136,5 МПа, что соответствует снижению на 6,8 % и на 13,4 % относительно значений предела прочности, полученного в опытах при 20 °C.

Скорость деформирования от 0,4 до 20 мм/мин при сжатии образцов композитов, подвергнутых есте-

ственному старению 48 лет, и температуре испытаний 20 °C влияет на исследованные механические характеристики незначительно. Имеется различие в сопротивлении деформированию композитов К-211-2 и К-18-36 со скоростями деформирования 20 мм/мин и 100 мм/мин при температуре 100 °C.

Определены значения параметра  $\chi$  критерия Писаренко – Лебедева (табл. 10):

$$\sigma_o = \chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_1,$$

что позволяет получить предельные кривые прочности композитов при нагружении в условиях плоского напряженного состояния [4].

Результаты исследования длительной прочности композитов К-211-2 и К-18-36 при статической сжимающей нагрузке, величина которой в ходе опыта поддерживалась постоянной, представлены в таблице 11 и аппроксимированы корреляционным уравнением  $\sigma = A - B \lg \tau$ . Значения параметров кривых дли-

тельной прочности приведены в таблице 12, где также даны прогнозируемые значения параметров  $A$  и  $B$  применительно к повышенным температурам 40 °С и 60 °С. Естественное старение образцов от 18–19 до 48 лет сказалось на длительной прочности при сжатии композитов К-211-2 и К-18-36 незначительно.

На следующем этапе испытаний образцы композитов К-211-2 и К-18-36 нагружались постоянной нагрузкой (соответствующее напряжение  $\sigma_{II}$ ) в течение 2, 3 и 4 часов ( $\lg \tau = 3,86 \div 4,16$ ,  $\tau$  в сек.), а затем производилась догрузка образцов до разрушения со скоростью деформирования 2 мм/мин. Значения разрушающих напряжений  $\sigma_{PP}$  представлены в таблице 13. Также приведены значения напряжений  $\sigma_d$ , определенные по уравнениям длительной прочности (табл. 12), отвечающим 50 % вероятности разрушения, при  $\lg \tau = 4$ .

Напряжения разрушения в процессе догрузки  $\sigma_{PP}$  при нормальной температуре (20 °С) несколько превышают кратковременную прочность  $\sigma_{НС}$ . При повышенных температурах отмечается снижение прочности К-211-2 на 13 %, а композита К-18-36 лишь на 4 %. Предельные напряжения  $\sigma_{PP}$  примерно на 25 % выше напряжений, определенных по кривой длительной прочности (50 % вероятность разрушения).

В таблице 14 приведены результаты испытаний образцов диаметром 12 мм и высотой 21 мм композита К-211-2 при сжатии со скоростью деформирования 2 мм/мин при температуре 20 °С после длительного естественного старения образцов в течение 18 лет. Образцы нагружались до заданного значения напряжений  $\sigma_{II}$  в течение определенного времени ( $\lg \tau_{II}$ ) и затем догружались до разрушения  $\sigma_{PP}$ . Опытные данные [1] по длительной прочности при сжатии образцов аппроксимированы корреляционным уравнением  $\sigma = 197,85 - 8,496 \lg \tau$  ( $\tau$  в сек.). 50 % вероятности разрушения.

Предельные напряжения  $\sigma_{PP}$  композита К-211-2 при деформировании со скоростью деформирования 2 мм/мин после предварительного длительного ( $\lg \tau_{II}$ ) нагружения ( $\sigma_{II}$ ) в двух опытах превысили значения предела прочности при той же скорости деформирования. Более значительная разница получена между предельными напряжениями  $\sigma_{PP}$  и напряжениями, определенными по кривой длительной прочности, отвечающей 50 % вероятности разрушения, а именно 9 %, 18 % и 22 %.

Изменение (снижение) кратковременной прочности не может быть использовано в качестве достоверного параметра оценки поврежденности композитов К-211-2 и К-18-36 на полимерной основе.

Таблица 12

Параметры корреляционных уравнений длительной прочности композитов

Материал	T, °C	Состояние материала	A, МПа	B, МПа
К-211-2	20	II	224,30	9,454
		III	221,92	9,561
	40	II	206,83	9,561
	60	III	191,30	9,561
К-18-36	20	II	144,38	5,890
		III	157,62	7,087
	40	II	136,50	7,087
	60	III	116,16	7,087

Таблица 13

Сопоставление предельных напряжений композитов при разных испытаниях

T, °C	Кол-во образ.	К-211-2				К-18-36			
		$\sigma_{II}$ , МПа	$\sigma_{PP}$ , МПа	$\sigma_{НС}$ , МПа	$\sigma_d$ , МПа	$\sigma_{II}$ , МПа	$\sigma_{PP}$ , МПа	$\sigma_{НС}$ , МПа	$\sigma_d$ , МПа
20	5	91,2	229,9	223,1	183,7	72,8	158,3	156,7	129,3
40	3	62,3	181,7	207,8	168,5	52,1	136,4	136,5	108,2
60	3	63,1	166,1	192,4	153,0	50,6	111,9	116,3	87,2

Таблица 14

Сопоставление предельных напряжений композитов К-211-2 при разных испытаниях

№ опыта	$\sigma_{II}$ , МПа	$\lg \tau_{II}$	$\sigma_{PP}$ , МПа	$\sigma_{НС}$ , МПа	$\sigma_d$ , МПа
1	124,0	4,14	177,5	194,6	162,7
2	119,0	4,18	198,5	194,6	162,3
3	168,0	3,28	204,2	194,6	167,0

## Выводы

1. Механические характеристики композиционных материалов на полимерной основе с дисперсными наполнителями К-211-2 и К-18-36 в результате многолетнего старения (до 48 лет) существенно зависят от температуры испытаний и скорости деформирования.

2. Особенности влияния длительного естественного старения на механические характеристики композитов К-211-2 и К-18-36 объясняется свойствами дисперсного наполнителя в матрице.

3. Изменение предела прочности при растяжении в результате многолетнего старения достигают увеличения на 6 % и уменьшения на 26 %, модуля упругости – на 33 % и на 17 %, предельных деформаций – на 90 % и на 17 % соответственно. Однако более длительное старение до 47 лет по сравнению с временем воздействия 18 лет влияет на механические характеристики менее значительно, но значительно зависит от температуры испытаний и скорости деформирования.

4. Предел прочности образцов композита К-211-2 при сжатии со скоростями деформирования от 0,05 до 100 мм/мин в результате дополнительного времени естественного старения от 18 до 48 лет увеличивался в среднем на 12 %, предельные деформации повышались в среднем на 51 %, а модуль упругости уменьшался в среднем на 18 %. Для композита К-18-36 эти механические характеристики изменялись в среднем на 4 %, 26 % и 20 % соответственно.

5. Вне зависимости от скорости деформирования при сжатии от 2 до 100 мм/мин повышение температуры испытаний композита К-211-2 от 20 до 60° С и затем до 100 °С приводит к снижению предела прочности в среднем на 16 % и на 41 %, а композита К-18-36 – на 26 % и на 47 % соответственно. Модуль упругости композитов при температуре 60 °С повысился в среднем на 14 % и на 23 %, а при температуре 100 °С снизился относительно результатов при температуре 20 °С на 7 % и на 14 %.

6. Скорость деформирования в диапазоне 0,4–20 мм/мин при сжатии состаренных образцов композитов и температуре 20 °С влияет на исследование механических характеристик незначительно.

7. Изменение параметров кривых длительной прочности композитов К-211-2 и К-18-36 при сжатии в результате естественного старения образцов от 18–19 до 48 лет незначительно.

8. Изменение (снижение) кратковременной прочности при догрузке образцов композитов К-211-2 и К-18-36 после предварительного длительного нагружения не может быть использовано в качестве достоверного параметра оценки поврежденности. Это заключение было сделано ранее на основе результатов испытаний образцов композита ВЛ на фенолформальдегидной основе с армированием асбестовыми волокнами [4].

## Литература

1. Павлов, П. А. Длительное сопротивление полимерных и композитных материалов с учетом времени многолетнего старения. Сопротивление деформированию и разрушению композитных материалов с дисперсным армированием / П. А. Павлов, Л. И. Огородов // Механика композитных материалов. – 1994. – № 6. – С. 771–780.

2. Огородов, Л. И. Результаты исследования сопротивления деформированию и разрушению ряда полимерных композитных материалов / Л. И. Огородов // Механика композитных материалов. – 1994. – № 6. – С. 771–780.

3. Failure of Structural Elements Made of Polymer Supported Composite Materials During the Multiyear Natural Aging / Blinkov P., Ogorodov L., Grabovyy P. – doi.org/10.1051/e3s/conf/20183301001 // E3S Web of Conferences 33,01001 (2018).

4. Павлов, П. А. Процесс повреждений и разрушение стохастически армированных полимерных композитов. I. Анализ моделей и экспериментальных данных при нестационарном пропорциональном нагружении / П. А. Павлов, Л. И. Огородов // Механика композитных материалов. – 1993. – № 6. – С. 755–764.

5. Огородов, Л. И. Механические характеристики полиэтилена низкой плотности при растяжении после многолетнего естественного старения / Л. И. Огородов, В. А. Шапкина // Вестник Вологодского государственного университета. – 2021. – № 3 (13). – С. 44–46.

*L.I. Ogorodov<sup>1</sup>, V.A. Shapkina<sup>2</sup>*

*<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,*

*<sup>2</sup>Vologda State University*

## MECHANICAL CHARACTERISTICS OF POLYMER-BASED COMPOSITE AFTER LONG-TERM NATURAL AGING

Mechanical characteristics under stretching and compression of two composite materials based on phenol-formaldehyde resin with dispersed reinforcement with wood flour and kaolin after many years (up to 48 years) natural aging of samples are presented. The test results are compared with the data of similar experiments on samples of composites in the state of delivery and after 18–19 years aging.

Composite, polymer base, dispersed fillers, long-term aging, mechanical characteristics, tension, compression.



*А.А. Сеницын, Д.А. Соболев*  
 Вологодский государственный университет

## **ОЦЕНКА КАЧЕСТВА НАРУЖНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛООВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ЗДАНИЯ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ**

В статье представлены результаты приборного энергообследования с применением тепловизионного контроля наружных строительных ограждений общественного здания АО «Вологдагортеплосеть», проведенного в рамках отработки практических навыков по профильной дисциплине «Энергетическое обследование объектов капитального строительства» магистерской образовательной программы «Теплогасоснабжение и вентиляция» Вологодского государственного университета с целью получения объективных данных о состоянии ограждающих конструкций здания, выявления возможных скрытых конструктивных, технологических, теплоизоляционных и строительно-монтажных дефектов и прочих тепловых аномалий.

Неразрушающий контроль, приборное обследование, сопротивление теплопередаче, тепловые потери.

Комплексное теплотехническое обследование наружных ограждающих конструкций (далее – НОК) зданий и сооружений с применением тепловизионной техники основано на определении сопротивления теплопередаче в реперной зоне и дистанционном измерении тепловизором температуры поверхностей ограждающих конструкций, между внутренними и наружными поверхностями которых имеется температурный перепад [1].

Методики теплового неразрушающего контроля опробованы в работах [1–2] коллектива НОЦ «Проблемы современной техносреды» ВоГУ и отражены в практических примерах описания патента на изобретение [3].

Ранее проведенные исследования в работах [4–5] позволяют говорить об эффективности предложенного метода.

Объект исследования – здание АО «Вологдагортеплосеть», расположенное по адресу: Вологодская область, г. Вологда, ул. Козленская, 43а (рис. 1).

В соответствии со СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» данный регион характеризуется сле-

дующими параметрами: средняя температура наружного воздуха отопительного периода  $-4,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , продолжительность отопительного периода 231 сут.

Условия проведения тепловизионного обследования: дата проведения обследования 17 ноября 2021 года; средняя температура внутри здания  $+18...+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура наружного воздуха  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, погодные условия соответствовали проведению тепловизионного обследования в соответствии с МДС 23-1.2007 «Методические рекомендации по комплексному теплотехническому обследованию наружных ограждающих конструкций с применением тепловизионной техники».

Визуализация тепловых полей и измерение температуры при тепловизионном обследовании наружных ограждающих конструкций выполнялось с применением инструментального оснащения НОЦ «Проблемы современной техносреды» на базе кафедры теплогазоснабжения ВоГУ.

Перед началом тепловизионной съемки были произведены замеры температуры поверхности на контролируемом объекте контактным методом.



Рис. 1. Общий вид объекта тепловизионного обследования



Рис. 2. Фотография наружной стены здания и ее термограмма

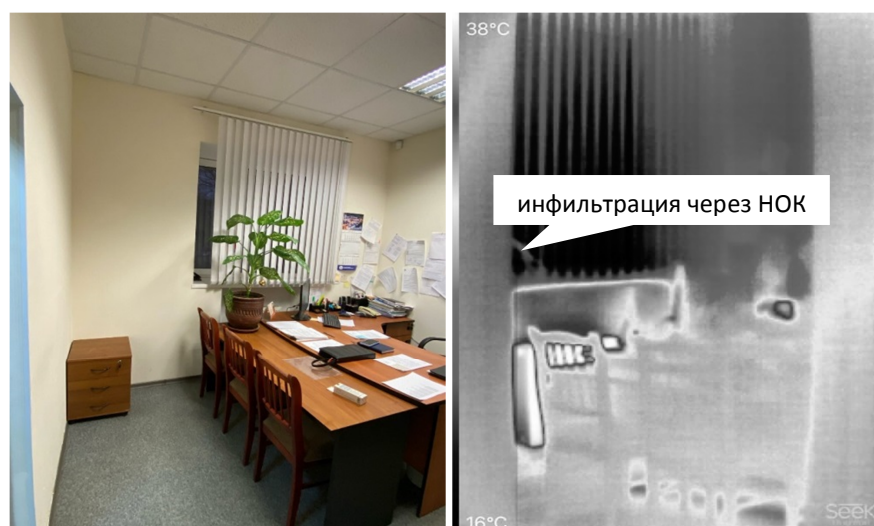


Рис. 3. Фотография одного из внутренних пространств здания и его термограмма

Обследование НОК проводилось в дневное время. В процессе измерений обследуемые поверхности не были подвержены воздействиям прямого и отраженного солнечного облучения.

Термографирование проводилось последовательно по предварительно намеченным участкам с покадровой записью термограмм и одновременной фотосъемкой этих участков.

Поверхность объекта – многослойная сэндвич-панель (трехслойная, из жесткого металла снаружи, внутри – устройство минерально-ватной теплоизоляции).

Состояние атмосферы – переменная облачность, без осадков.

Описание приборной базы: термогигрометр Testo 625, пирометр Testo 845, мобильный тепловизор Seek Thermal Pro.

Фрагменты результатов измерений представлены на рисунках 2, 3.

Информация о съемке: дата 16.11.21, время 10:40, отраж. темп. 4,5 °С.

Комментарии: на термограмме выявлены теплотери оконных проемов и участки промерзаний стены и основания конструктива.

Информация о съемке: дата 16.11.21, время 10:55, отраж. темп. 16,5 °С.

Комментарии: на термограмме зарегистрированы зоны инfiltrации холодного воздуха через оконные проемы.

#### Результаты тепловизионного обследования

Температурное поле на поверхности диагностируемых поверхностей (ограждающих конструкций) внутри обследуемых помещений достаточно равномерное. Средний температурный показатель по глади несущих ограждающих конструкций составил порядка 18,5 °С с учетом температуры внутри помещений 23,0 °С и с учетом специфики обогрева объекта обследования на момент проведения контроля. Согласно данным значениям температурные показатели имеют допустимые значения по СНиП 23-02-2003 п. 5.8 с учетом натурных погодных условий на момент проведения обследования.

Однако были определены и зарегистрированы конструктивные тепловые аномалии в виде локальных участков промерзаний основания конструктива. Также были определены локальные инфильтрации наружного воздуха через устройства дверных и оконных блоков, преимущественно по уплотнительной системе, вследствие перекоса полотен и некачественной регулировки фурнитуры.

Температурное поле на поверхности наружных диагностируемых поверхностей снаружи достаточно равномерное. Средний температурный показатель по глади ограждающих конструкций на момент проведения обследования составил порядка 4,5 °С, что соответствует допустимым значениям согласно СНиП 23-02-2003 п. 5.8.

Учитывая тот факт, что внутренние помещения обогревались принудительными элементами отопления, были определены и зарегистрированы следующие тепловые аномалии, не соответствующие нормируемым значениям: теплопотери через устройство цоколя, нарушение теплового поля на поверхности отдельных несущих конструкций, теплопотери через монтажные швы устройств оконных блоков.

В настоящей работе выполнено натурное тепловизионное обследование объекта теплотребления в реальных условиях, а также отработаны практические навыки применения методики неразрушающего контроля по профильной дисциплине «Энергетическое обследование объектов капитального строительства» магистерской образовательной программы «Теплогазоснабжение и вентиляция» Вологодского государственного университета.

Работа выполнена в соответствии с деятельностью молодежной исследовательской лаборатории Smart Nanomaterials for Energy Efficiency (Умные наноматериалы для повышения энергоэффективности), созданной по итогам отбора на реализацию государственного задания Минобрнауки РФ по созданию молодежных лабораторий в рамках нацпроекта «Наука и университеты».

*A.A. Sinitsyn, D.A. Sobolev  
Vologda State University*

#### **QUALITY ASSESSMENT OF EXTERNAL CONSTRUCTION FENCES WITH THE USE OF THERMAL NON-DESTRUCTIVE TESTING OF HEAT SUPPLY COMPANY BUILDING**

The article presents the results of an instrument energy survey using thermal imaging control of external construction fences of a public building of Vologdagorteploset JSC conducted as part of the development of practical skills in the profile discipline “Energy inspection of capital construction objects” of the Master's educational program “Heat, Gas Supply and Ventilation” of Vologda State University in order to obtain objective data on the condition of the building's enclosing structures, identifying possible hidden structural, technological, thermal insulation and construction and installation defects and other thermal anomalies.

Non-destructive testing, instrument inspection, heat transfer resistance, heat loss.

#### **Литература**

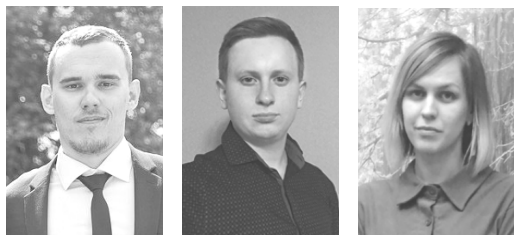
1. Синицын, А. А. Основы тепловизионной диагностики теплотребляющих объектов строительства : учебное пособие / А. А. Синицын, Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Вологда : ВоГУ, 2014. – 160 с.

2. Карпов, Д. Ф. Комплексная энергосберегающая диагностика технического состояния ограждающих конструкций объектов капитального строительства и инженерных систем на основе теплового контроля / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Синицын // Энергосбережение и водоподготовка. – 2020. – № 2 (124). – С. 29–33.

3. Патент № 2530473 С1 Российская Федерация, МПК G01N 25/18. Устройство и способ комплексного определения основных теплофизических свойств твердого тела: № 2013119005/28: заявл. 23.04.2013; опубл. 10.10.2014 / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Синицын [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Вологодский государственный университет» (ВоГУ).

4. Некоторые особенности и результаты теплового контроля навесных вентилируемых фасадных систем объектов капитального строительства / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов, А. А. Синицын [и др.]. – DOI 10.21822/2073-6185-2020-47-1-147-155 // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2020. – Т. 47, № 1. – С. 147–155.

5. Карпов, Д. Ф. Определения термодинамических свойств ограждающих конструкций методом теплового нагружения / Д. Ф. Карпов, М. В. Павлов // Материалы II ежегодных смотров-сессий аспирантов и молодых ученых по отраслям наук : в 2 томах. – Вологда : Вологодский государственный технический университет, 2008. – С. 210–218.



*С.А. Соловьев, Л.С. Шевцов, А.А. Соловьева  
Вологодский государственный университет*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АРБОЛИТА И ДРЕВЕСНО-ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ КАК СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Исследование выполнено в рамках договора № 00/01 от 23 мая 2022 г.  
на выполнение научно-исследовательской работы с ООО «Компания АльянсИнвестСтрой»*

Использование различных продуктов переработки в строительных материалах позволяет создавать эффективные строительные конструкции с определенной экономической и экологической эффективностью. В данной статье исследуются и анализируются этапы возникновения арболита и аналогичных древесно-цементных композитов (ДЦК), а также древесных композиций с другими вяжущими как строительных материалов. Классический арболит представляет собой легкий бетон на цементном вяжущем, древесной дробленке и химических добавках. Приводится информация о первых зарубежных и советских патентах в области смесей древесно-цементных композитов и изделий на их основе. Отмечена региональная специфика производства арболита, заключающаяся в использовании в качестве крупного заполнителя местного органического сырья или продуктов вторичной переработки. Приведены сведения о текущих сферах использования строительной продукции на основе древесно-цементных композитов в России и за рубежом.

Арболит, легкий бетон, органические заполнители, патенты, древесно-цементный композит.

Согласно ГОСТ 19222-2019 «Арболит и изделия из него», арболит – легкий бетон на цементном вяжущем, древесной дробленке и химических добавках. Арболит является одним из видов легких бетонов, которые производятся на органическом заполнителе (щепе). Расчетное сопротивление арболита по ГОСТ 19222-2019 при сжатии составляет от 0,3 до 2,1 МПа, при осевом растяжении – от 0,087 до 0,570 МПа. На основе этих характеристик арболит используется или в виде теплоизоляционных самонесущих элементов строительных конструкций, или в виде элементов кладки стен.

Одной из приоритетных экономических задач в настоящее время остается развитие системы использования отходов деревопереработки в различных сферах экономики РФ. Целью настоящей работы является поиск и анализ исследований свойств и сфер использования древесно-цементных композитов на базе первых патентов и других видов интеллектуальной собственности.

Идея создания композитного материала из органических отходов и связующих в виде глины или извести появилась еще в метафизический период. Создание древесно-цементного композита обусловлено наличием цемента в смеси, который был изобретен в текущем виде в начале XIX века. Научно-технические предпосылки к разработке арболита как материала для строительных блоков появились также в XIX веке. Например, использование опилок в качестве мелкого заполнителя для растворов отмечается в патенте US4420A (США, 1846). В 1856 году были предложены композиты цемента и остатков кожной

продукции, которые прессовались в листы US15121A (США, 1856).

Одним из первых изобретений состава аналогичного арболиту можно считать патенты Самуэля Фовлера 1860-х годов [1]. Предлагаемый состав содержит деревянную или органическую фибру, вводимую в раствор. Отмечается огнестойкость данного материала – он используется даже для конструкции огнестойких сейфов. Также отмечается, что «композиция может быть выполнена в виде кирпича или плитки и использоваться при возведении стен в любом из вышеупомянутых сооружений или для любой другой подходящей цели». С. Фовлер также сообщает, что «для улучшения конструкции бетонных стен используются более грубые заполнители, такие как кукурузные початки или щепя, т.к. они являются наиболее экономичными, поскольку требуется меньше извести или цемента, чтобы сделать хорошую, прочную стену для оштукатуривания».

В патенте [2] 1869 года изобретатель Юлий Эдмунд Дотч декларирует формулу: «Смесь волокнистых материалов животного или растительного происхождения, таких как древесная кора, опилки, овечья шерсть, отходы, солома или аналогичный материал либо в сухом состоянии, либо в том же виде обработанный вареным льняным или другими маслами, с асфальтом, дегтем, смолой или любым другим гидрокарбонатом, используемый отдельно или в сочетании с торфом, угольной золой, шлаком, гравием, битым камнем, песком, гидравлическим цементом, гипсом, инфузориями, сланцем, мраморной пылью, кирпичной пылью или любым другим минералом».

отмечая что «я использую и применяю эту смесь либо в виде сплошной массы, либо формую и прессую ее в блоки, плитки, сланцы и т.д.».

В патенте 1894 года [3] указано: «Да будет известно, что я, Людвиг Гротн, управляющий, подданный германского императора, применил такое изобретение для образования защитных слоев для камня и других материалов и придания им способности выдерживать воздействие атмосферы». Разработанный камень состоял из следующих компонентов: вода, опилки или щепа, хлорид магния, глина или другое землистое вещество, кальцинированный магnezит. В патенте US290228A (США, 1883) также используются опилки, цемент и водный раствор клея для создания облицовочного материала для кирпичных стен.

Изобретатель Август Фогель изготовил конструкции ящиков и теплиц для садоводства из древесно-цементного композита и представил их в качестве новинки на Весенней выставке цветов Баварской садоводческой компании в Мюнхене в 1911 году. В 1913 году Джон Парди предложил использовать опилки и щепу как наполнитель смесей для создания покрытий тротуаров [4].

В 1926 году в Великобритании был зарегистрирован патент «Улучшенный бетонный строительный блок» [5]: строительные блоки изготавливаются из смеси 9 частей по объему древесной щепы, одной части портландцемента и 3 частей подходящего наполнителя, такого как зола, для использования в качестве связующего.

Затем голландец Ричард Хэндл подал заявку на патент «Способ изготовления легкого строительного материала из древесных отходов и цемента» в 1932 году. В 1933 году немецкая компания «IG Farbenindustrie AG» (И.Г. Фарбениндустри) зарегистрировала патент «Способ производства древесного бетона» [6], в котором содержатся древесные отходы или древесная щепа, жидкое стекло и цемент, отличающийся тем, что используется древесина с небольшими количествами сильно разбавленного раствора жидкого стекла для получения влажной смеси, которая затем перемешивается с коммерческим цементом и водой.

В 1938 году открылась известная компания Durisol Ag (или Leichtbaustoffe Durisol A Fuer – Легкие конструкционные материалы Дюрисол А). В 1939 году компания зарегистрировала патент «Способ получения бетона, содержащего волокнистые вещества» (Швейцария) [7]. Сам патент содержит следующую результирующую часть: «Способ производства бетона, содержащего волокнистые вещества, отличающийся тем, что волокносодержащие вещества предварительно обрабатывают раствором сульфата алюминия и известковым молоком, а затем смешивают со связующим веществом... в качестве волокнистого материала используют древесную стружку или опилки, или солому, или шерсть животных». В качестве связующих предлагалось использовать цемент или различные виды извести. В состав смеси также допускалось добавлять песок, шлак, дробленый кир-

пич, туф, пемзу, синтетическую пемзу и различные добавки.

Далее, компания Durisol расширяет ассортимент продукции и в 1948 году патентует кладку из пустотелых блоков [8]. Примечательно, что в качестве блоков для кладки рекомендуется применять «пустотелые блоки, которые изготовлены из атмосферостойкого, стойкого к гниению и огнестойкого материала, например легкого бетона, который может состоять из связанной цементом минерализованной древесной стружки». Впоследствии Durisol AG производила и продавала строительные материалы на международном уровне, в том числе путем выдачи лицензий.

В 1959 году компания патентует «Способ ускорения начального твердения строительных материалов» [9]. Способ заключается в том, что затвердевающие, свежесформованные блоки подвергаются периодическим изменениям температуры во влажных, содержащих углекислый газ нагревательных камерах, при этом относительная влажность воздуха не опускается ниже 75 % даже при верхнем температурном пределе, а содержание углекислого газа не опускается ниже 5 %. В патенте 1970 года данный способ развивается в проект конвейерной линии, совмещающей теплые и холодные зоны с высокой влажностью и необходимым уровнем двуокиси углерода.

Патентные права на первые виды и составы арболитовых блоков истекли в середине 1980-х годов. Впоследствии Durisol стала всемирно защищенным товарным знаком канадской Durisol International Corp., которая получила права на товарный знак.

Известно, что в СССР первые масштабные исследования арболита как строительного материала начались в середине XX века. Хотя исследования древесно-цементных композитов проводились в СССР с 20-х годов под названием «деревобетон». Так, например, хорошо известна книга профессора Петрова Виктора Павловича «Дерево-бетон: свойства дерево-бетона как конструктивного материала», изданная в 1936 году Ленинградским институтом инженеров железнодорожного транспорта.

Советские ученые внесли большой вклад в разработку новых видов арболита, а также оптимизацию его свойств. Уже в 1964 году Ильичевым Львом Иосифовичем была защищена кандидатская диссертация «Эффективность применения в ограждающих конструкциях малоэтажных зданий арболита, изготавливаемого на базе отходов лесной и деревообрабатывающей промышленности» [10], содержащая более 300 страниц исследований арболита.

В 1967 году Алма-Атинским научно-исследовательским и проектным институтом строительных материалов было получено авторское свидетельство о разработке способа ускорения твердения арболитовых блоков [11]. Метод заключается в том, что наполнитель замачивается раствором натриевого жидкого стекла в количестве ~5 % безводного вещества от веса наполнителя, после чего в полученную смесь вводят цемент, а затем хлористый кальций в количестве 2,5 % от веса цемента. Предел прочности арболита повышался на

60 % в возрасте 7 дней и на 50 % в возрасте 28 дней по сравнению с арболитом, содержащим только хлористый кальций. Аналогично в 1968 году в Горьковском инженерно-строительном институте имени В.П. Чакова был разработан способ изготовления арболита, ускоряющий его твердение (В.А. Войтович и А.К. Яворский, АС SU 258904 А1). Для этого в состав смеси арболита добавлялся диэтаноламин в составе 0,2–0,6 % от веса вяжущего вещества. Скорость твердения арболита ускорялась на 60–70 %.

С конструкционной точки зрения арболит обладает меньшей прочностью, чем бетон или дерево. Поэтому перед советскими учеными стояла задача разработки высокопрочных арболитовых составов. При достижении необходимой прочности арболит превосходит аналогичные материалы по показателям плотности, теплопроводности и паропроницаемости. Решение такой задачи было предложено центральным Научно-исследовательским институтом бетона и железобетона в 1969 году [12] – введение специальной добавки позволяло увеличить прочность арболита до 5 МПа.

В 1971 году Научно-исследовательский институт бетона и железобетона предложил способ изготовления арболитовых изделий, повышающий прочность арболитовых блоков и ускоряющий процесс их твердения (Г.А. Бужевич, Г.А. Евсеев). Это достигается тем, что термообработку арболитовых изделий осуществляют отходящими газами известковых печей с температурой 50–100 °С. Предлагаемый способ позволяет ослабить отрицательное воздействие экстрактивных веществ древесины на твердеющий цемент. Отходящие дымовые газы котельных или известковых печей, используемые для обработки арболита, содержат 15–30 % углекислого газа. Углекислый газ, проникающий в поры арболитовых изделий, замедляет процесс образования сахаратов кальция и вызывает рост кристаллов СаСО<sub>3</sub>. Предлагаемая обработка способствует нормальному ходу гидратации цемента в присутствии экстрактивных веществ заполнителей из древесины и повышает прочность арболита, а также ускоряет процесс его приготовления.

Наряду с этими исследованиями, активно изучались вопросы изменения видов вяжущих в составе арболита. Институт леса и древесины имени В.Н. Сукачева в 1971 году запатентовал новый способ получения арболита. Цель изобретения: повысить прочность изделий, ускорить срок твердения и упростить технологию изготовления. Для этого используют известный способ получения арболита путем двухстадийного перемешивания заполнителя, например древесной дробленки, и вяжущего с последующим формованием. На первой стадии перемешивание производят с активированным вяжущим в количестве 20–30 % по весу от общего расхода, выдерживают в течение 10–24 часов при температуре не ниже +15 °С. Затем перемешивают с остальным количеством вяжущего, например портландцементом. На первой стадии перемешивания используют гипсобелитошламовое, а также магнезиальное вяжущее.

Также в 1970-х были решены задачи по повышению прочности арболита вследствие использования не выдержанной на воздухе древесины. Для этого использовалось жидкое стекло и сернокислое железо. Автором таких изобретений стал Центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт механизации и энергетики лесной промышленности (В.Я. Акодус, Б.Н. Смирнов, Т.В. Минакова).

Производство арболита зачастую имеет регионально выраженную специфику, заключающуюся в использовании в качестве заполнителя органические продукты вторичной переработки местного сырья. В 1969 году Алма-Атинским научно-исследовательским и проектным институтом строительных материалов было получено авторское свидетельство о разработке состава арболита на основе гузапай (или стебля хлопчатника) (Г.А. Батырбаев и Р.Б. Утегенова). В составе арболита дробленые стебли хлопчатника, портландцемент М300, вода и хлористый кальций. Указанный арболит при плотности 600 кг/м<sup>3</sup> выдерживает напряжение до 1 МПа, что соответствует классам В1,5, В2 и может использоваться как конструкционный материал для индивидуальных жилых домов.

В патенте «Арболит на основе вторичных ресурсов пищевых предприятий» [13] предлагается использовать муку, полученную из органических отходов пищевых производств (например, в пивоваренном производстве – высушенная пивная дробина, а в масложировом производстве – шелуха масличных семян), с размерами частиц 0,75...1,4 мм. В результате можно получить хороший теплоизоляционный материал с коэффициентом теплопроводности 0,068 Вт/м·°С при структурной прочности 0,8 МПа и плотности 350 кг/м<sup>3</sup>.

Специфика отдельных регионов позволяет производить арболит из костры. Костра – это одревесневшие части стеблей прядильных растений, получаемые при мятье и трепании льна, конопли, кенафа, кендыря. В патенте [14] «Сырьевая смесь для получения арболита» предлагается использовать льяную костру вместо древесной щепы. При указанных пропорциях можно получить материал с прочностью 1,04 МПа, плотностью 490 кг/м<sup>3</sup> и коэффициентом теплопроводности 0,9 Вт/м·°С.

В разработке Центрального научно-исследовательского экспериментального и проектного института по сельскому строительству [15] используется лиственница Гмелина или даурская лиственница для получения древесной щепы. Содержание сахаров в обработанной дробленке даурской лиственницы составляет 0,03–0,05 %. Такое незначительное количество не влияет отрицательно на схватывание цементного теста, следовательно нет необходимости вводить в смесь химические добавки, кроме того расход воды снижается в 3 раза.

На текущий момент в РФ преобладает строительная продукция из арболита в виде полнотелых блоков или элементов несъемной опалубки. Зарубежная продукция представлена в основном пустотелыми блоками, которые затем заполняются армированным бетоном. Такая технология получила название ICFs

(Insulated Concrete Forms) – модульная система блоков с жестким утеплителем. Блоки изготавливают из арболита, а в пустоты закладывают арматуру и заливают бетон. Известные производители блоков – Fasewall (США), Nexsem, IsoTex (Европа).

В исследовании приведены этапы возникновения арболита и аналогичных древесно-цементных композитов как строительных материалов. Отмечена региональная специфика производства арболита, заключающаяся в использовании в качестве крупного заполнителя местного органического сырья или продуктов вторичной переработки. Приведены сведения о текущих сферах использования строительной продукции на основе древесно-цементных композитов в России и за рубежом.

### Литература

1. Патент US69331A США, МПК C04B28/14. Improved composition of matter for filling safes, and for other purposes : заявл. 01.10.1867 : опубл. 01.10.1867 / Fowler S. T.
2. Патент US97893A США, МПК C04B26/003. Improved concrete for paving and for other purposes : заявл. 14.10.1869 : опубл. 14.12.1869 / Dotch J. E.
3. Патент US521264A США, МПК C04B28/02. Artificial Stone : заявл. 12.09.1893 : опубл. 12.06.1894 / Grote L.
4. Пат. US1090084A США, МПК C08H8/00. Paving material : заявл. 13.02.1913 : опубл. 10.03.1914 / John S. E. Padree.
5. Патент GB275680A Великобритания, МПК C04B28/04. An improved concrete building block : заявл. 12.02.1926 : опубл. 12.08.1927 / Robins F. A., Taylor F. M.
6. Патент DE666785C Германия, МПК C04B28/26. Process for the production of wood concrete : заявл. 08.12.1933 : опубл. 28.10.1938 / Dr. Fritz Graf, Dr. Hans Wolf.
7. Патент CH216902A Швейцария, МПК C04B20/1055. Process for the production of a concrete containing fibrous substances : заявл. 01.06.1939 : опубл. 30.09.1941 / Leichtbaustoffe Durisol A Fuer.
8. Патент DE812004C Германия, МПК E04B2/26. Hollow block masonry : заявл. 06.11.1948 : опубл. 27.08.1951 / Durisol AG.
9. Патент CH388168A Швейцария, МПК C04B40/0231. Process to accelerate the initial hardening of building materials : заявл. 10.09.1959 : опубл. 15.02.1965 / Herzig Ernst.
10. Ильичев, Л. И. Эффективность применения в ограждающих конструкциях малоэтажных зданий арболита, изготавливаемого на базе отходов лесной и деревообрабатывающей промышленности : специальность 05.00.00 «Технические науки» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Л. И. Ильичев. – Москва, 1964. – 271 с.
11. АС SU 233506 А1 СССР, МПК C04B 40/00. Способ ускорения твердения арболитовых изделий : опубл. 01.01.1969 / Батырбаев Г. А.
12. АС SU 250718 А1 СССР, МПК C04B 18/26. Арболит : заявл. 04.08.1967 : опубл. 12.08.1969 / Бу-жевич Г. А. [и др.].
13. Патент RU 2689351 C1 Россия, МПК C04B 38/10. Арболит на основе вторичных ресурсов пищевых предприятий : заявл. 12.12.2017 : опубл. 27.05.2019 / Шахов С. В. [и др.].
14. Патент SU 1618737 А1 СССР, МПК C04B 28/04. Сырьевая смесь для получения арболита : заявл. 18.04.1988 : опубл. 07.01.1991 / Краснов А. М. [и др.].
15. Патент SU 1740348 А1 СССР, МПК C04B 28/04. Способ получения арболита на основе дробленки даурской лиственницы : заявл. 07.12.1989 : опубл. 15.06.1992 / Тутрушвили К. А. [и др.].

*S.A. Solovyov, L.S. Shevtsov, A.A. Solovyova*  
*Vologda State University*

## RESEARCH OF THE ORIGIN OF PAPERCRETE AND WOOD-CEMENT COMPOSITES AS STRUCTURAL MATERIALS

The use of various waste products as structural materials makes it possible to create effective decisions for buildings and structures. The article presents and analyzes the origins of papercrete and similar wood-cement composites as structural materials. The information about the first foreign and Soviet patents in the field of mixtures of wood-cement composites and products based on them is provided. The regional specificity of papercrete production which is in using local organic raw materials or recycled products as an aggregate is paid attention to. The information is given about the current areas of use of construction products based on wood-cement composites in Russia and abroad.

Papercrete, lightweight concrete, organic aggregates, patents, wood-cement composites.



## ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИОННЫХ СВЯЗЕЙ В КОМПОЗИЦИОННОМ МАТЕРИАЛЕ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ПОКРЫТИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Данная работа посвящена вопросам исследования адгезионных связей в композиционном материале на основе природного щебня из гранита и габбро-диабазы и щебня из сталеплавильного и доменного шлака для поверхностной обработки покрытия автомобильных дорог. Основным методологическим инструментом для решения этой задачи было использование современного метода исследования, в частности спектрофотометрического способа определения величины адгезии обычного и модифицированного нефтяного дорожного битума к поверхности щебня из природных и техногенных материалов. Впервые проведено исследование адгезионных связей в композиционном материале на основе щебней из природных и техногенных материалов в сочетании с модифицированными битумами.

Адгезионные связи, композиционный материал, битум, модифицированный битум, автомобильная дорога, поверхностная обработка покрытия, щебень из сталеплавильного шлака.

В настоящее время самым распространенным методом быстрого восстановления дорожного полотна и повышения характеристик безопасности дорожного движения является технология поверхностной обработки. Поверхностная обработка позволяет устранить дефекты на дороге, особенно в случае, когда нет возможности удаления старого асфальтового покрытия. Важной задачей на сегодняшний день является улучшение качества, надежности и снижение стоимости поверхностной обработки покрытия автомобильной дороги. Такую задачу можно решить за счет применения новых технологических методов и использования нетрадиционных каменных материалов. Большое значение имеет использование в технологии поверхностной обработки местных техногенных вторичных продуктов, в частности щебня из металлургических шлаков. Целью работы является исследование адгезионных связей в композиционном материале для поверхностной обработки покрытия автомобильных дорог и повышения технико-экономической эффективности за счет использования природных и техногенных щебеночных каменных материалов.

В данной работе нами впервые были проведены экспериментальные исследования по определению величины адгезии нефтяного дорожного битума и модифицированного битума к поверхности гранитного щебня, щебня из габбро-диабазы, а также щебня из сталеплавильного и доменного шлака спектрофотометрическим методом [1, 2]. Исследования были проведены на спектрофотометре ПЭ-5300В. Спектрофотометр ПЭ-5300В разработан в соответствии с требованиями, предъявляемыми в российских химико-аналитических лабораториях к спектральным приборам для анализа вод, для технологического контроля сырья и готовой продукции различных отраслей промышленности. Программное обеспечение для персонального компьютера поставляется в комплекте со спектрофотометром ПЭ-5300В и позволяет отобра-

жать, хранить и распечатывать результаты. Принцип действия прибора основан на сравнении светового потока, прошедшего через растворитель или контрольный раствор, по отношению к которому проводится измерение, и светового потока, прошедшего через исследуемую среду.

Определение площади покрытия поверхности каменных материалов битумной эмульсией выполняем в несколько этапов:

1 этап: подготовка раствора метиленового голубого с оптической плотностью 1,500–1,600 ( $D_{\text{нск}}$ ).

2 этап: подготовка 15 навесок щебня одного вида по 25 г, фракции 5–10 мм:

- 5 навесок щебня, поверхность которого полностью покрыта битумом (искусственно созданная 100 % адгезия);

- 5 навесок щебня, поверхность которого не покрыта битумом (искусственно созданная нулевая адгезия);

- 5 навесок щебня, покрытых битумом, адгезию которого необходимо определить, и прокипяченных в течение 30 минут в дистиллированной воде (в соответствии с ГОСТ 11508-74 [2]).

3 этап: в лабораторные стаканчики емкостью 50 мл помещаем все пятнадцать образцов щебня и заливаем раствор метиленового голубого и оставляем на 24 часа.

После 24 часов выдерживания образцов в растворе метиленового голубого определяем оптическую плотность раствора в стаканчиках:  $D_0$  %,  $D_{100}$  %,  $D_x$  соответственно.  $D_0$  % – оптическая плотность раствора, в котором на протяжении 24 часов находился щебень, непокрытый битумной эмульсией (нулевая адгезия).  $D_{100}$  % – оптическая плотность раствора, в котором на протяжении 24 часов находился щебень, полностью покрытый битумной эмульсией (100-процентная адгезия).  $D_x$  – оптическая плотность раствора, в котором на протяжении 24 часов находился ще-

бень, прошедший испытание кипячением (реальная адгезия).

4 этап: определение площади покрытия поверхности щебня битумом.

Для определения площади покрытия битумом навески щебня, прошедшего испытание кипячением, необходимо при помощи спектрофотометра определить оптическую плотность растворов после 24-х часов выдерживания в них щебня.

По полученным данным строим линию адсорбции: слева откладываем значение оптической плотности раствора, в котором находился щебень со 100 % адгезией, справа откладываем значение оптической плотности раствора, в котором находился щебень с адгезией 0 %. Проводим линию адсорбции, соединив крайние значения. Откладываем значение оптической плотности исследуемого раствора и определяем величину адгезии по горизонтальной шкале.

В ходе работы были проведены теоретические и экспериментальные исследования свойств щебеночных материалов различного происхождения, таких как известняк, гранит, габбро-диабаз, доменный и сталеплавильный шлаки. Для поверхностной обработки покрытия автомобильной дороги необходимо соответствие физико-механических свойств щебеночных каменных материалов требованиям, указанным в рекомендациях [3]. Все исследуемые виды щебеночного материала, включая известняк, полностью удовлетворяют этим требованиям. В качестве вяжущего для композиционных материалов был использован нефтяной дорожный битум БНД 60/90 и модифицированный битум с адгезионной добавкой «Амдор-9».

Следующим обязательным требованием является достаточное значение величины адгезии битумного вяжущего к поверхности щебня из природного или техногенного каменного материала.

Степень адгезии битума к поверхности щебеночного каменного материала зависит от его химической природы. Основные карбонатные породы (известняк) имеют на своей поверхности положительный заряд, кислые (гранит) – отрицательный. В то же время в составе нефтяного дорожного битума преобладают анионоактивные вещества. То есть битум несет отрицательный заряд. С точки зрения электростатической теории адгезии хорошее сцепление битума с основными породами объясняется разноименными зарядами поверхности каменного материала и битума. Плохое сцепление битума с кислыми породами (гранит) объясняется одноименными зарядами каменного материала и битума.

Рассматривая такой показатель, как модуль основности (отношение содержания суммы щелочных оксидов  $\text{CaO}+\text{MgO}$  к сумме содержания оксидов кремния и алюминия  $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ , %), мы можем предположить, что горная порода известняк, состоящая преимущественно из карбоната кальция ( $\text{CaO}$ ), которая имеет высокий модуль основности (равный 60 %), будет также иметь высокую адгезию с битумом, а гранит, являющийся кислой горной породой, содержащий 72 % кремнезема  $\text{SiO}_2$  с модулем основ-

ности 0,048 %, – низкую. Исходя из этого, чем больше модуль основности материала, тем выше адгезия.

Так как известняк не соответствует требованиям рекомендаций [3] по прочности, а в случае гранита наблюдается низкая адгезия, целесообразно рассмотреть не уступающий граниту по прочности природный каменный материал – габбро-диабаз. Габбро-диабаз, который содержит 48,5 % кремния  $\text{SiO}_2$ , 11,5 % кальция  $\text{CaO}$  и имеет модуль основности, равный 0,285 %, должен по нашим гипотетическим предположениям иметь высокую адгезию.

Рассматривая материалы с точки зрения экономии, мы также ожидаем больших перспектив при применении отходов производства – металлургических шлаков ПАО «Северсталь», г. Череповец. Так как шлаки (доменный, сталеплавильный) соответствуют требованиям рекомендаций [3] и имеют средний модуль основности, равный 1,508 % – доменный и 2,6 % – сталеплавильный, они будут хорошо работать в сочетании с битумом БНД 60/90.

Значения модуля основности щебеночных материалов рассчитаны в зависимости от их химического состава и приведены на диаграмме (рис. 1). Модуль основности доменного шлака (как средний) взят за единицу. Значения указаны в долях единицы.

Завершающим и важнейшим этапом диагностики эффективности композиционного материала для поверхностной обработки покрытия автомобильных дорог является определение внутренних адгезионных связей, а именно определение величины адгезии битумных вяжущих к поверхности щебеночного каменного материала. Это исследование должно быть обязательным, так как может наблюдаться неудовлетворительная адгезия битумного вяжущего к поверхности каменного материала даже при наличии у последнего требуемых физико-механических свойств.

Вяжущие, имеющие достаточное сцепление с минеральным щебеночным материалом, нельзя оторвать механическим усилием, его вытягивают и разделяют, но не отрывают. Если в результате какого-то усилия достигается действительный отрыв вяжущего от минерального материала, это означает, что вяжущее не имело сцепления с данным материалом. Показатель сцепления (адгезии) битума и щебня определяется на частицах щебня крупнее 10 мм. Таким образом, за показатель сцепления принимается визуально определяемая величина поверхности щебенки, сохранившей битумную пленку после создания растягивающих усилий кипячением в течение 30 минут в воде. Мы определили величину адгезии спектрофотометрическим методом с использованием спектрофотометра ПЭ-5300В с точностью до 1 %.

Нами проведены исследования с чистым битумом БНД 60/90 и модифицированным битумом БНД 60/90 с 3 % адгезионной добавкой «Амдор-9». Результаты исследования адгезии битумных вяжущих к поверхности щебня из гранита, габбро-диабазы и сталеплавильного и доменного шлаков приведены на диаграммах (рис. 2–5).

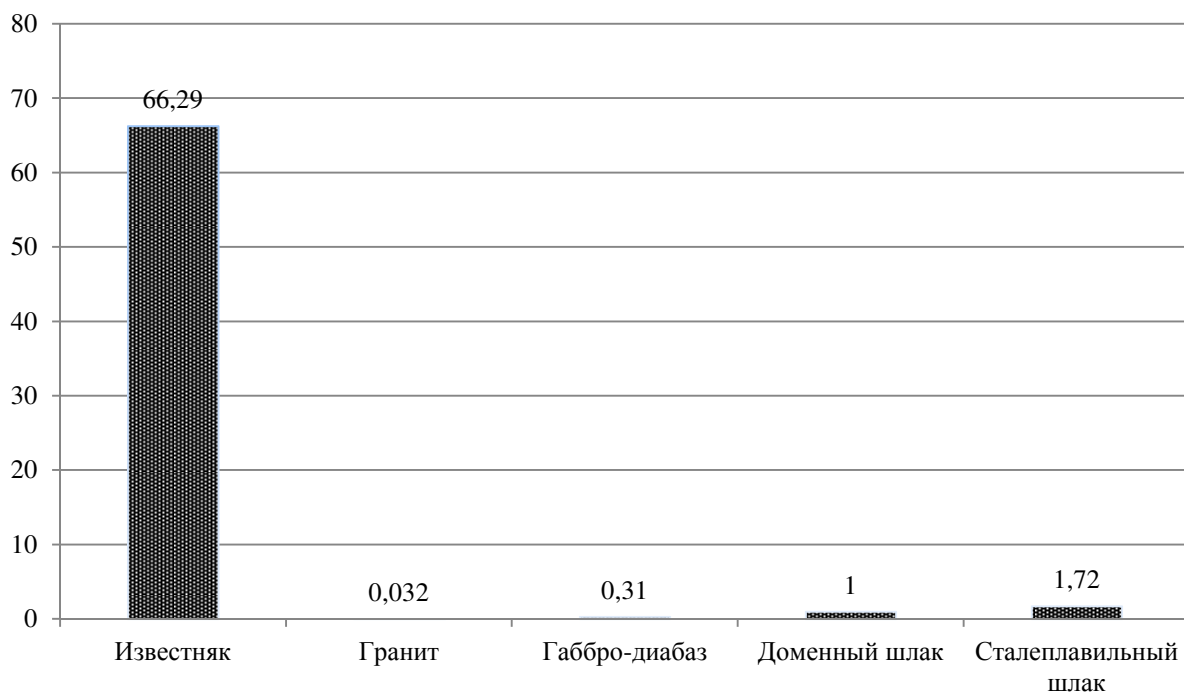


Рис. 1. Значения модуля основности щебеночных каменных материалов

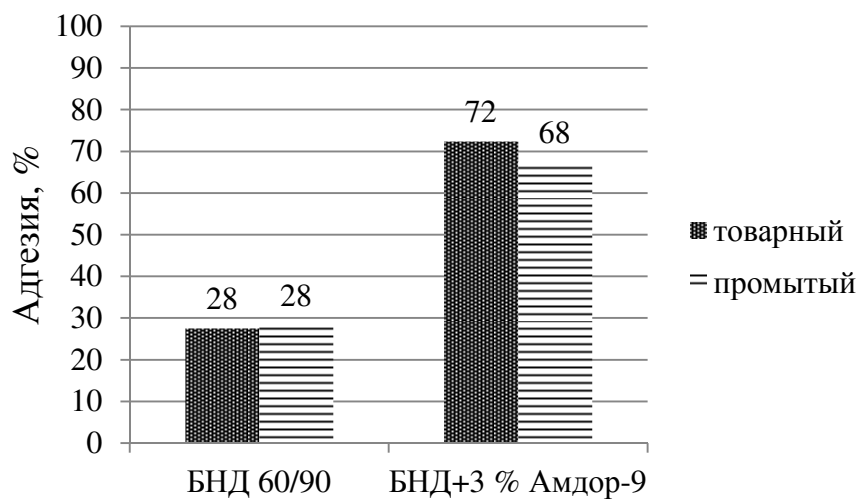


Рис. 2. Результаты определения адгезии битумных вяжущих к щебню из гранита

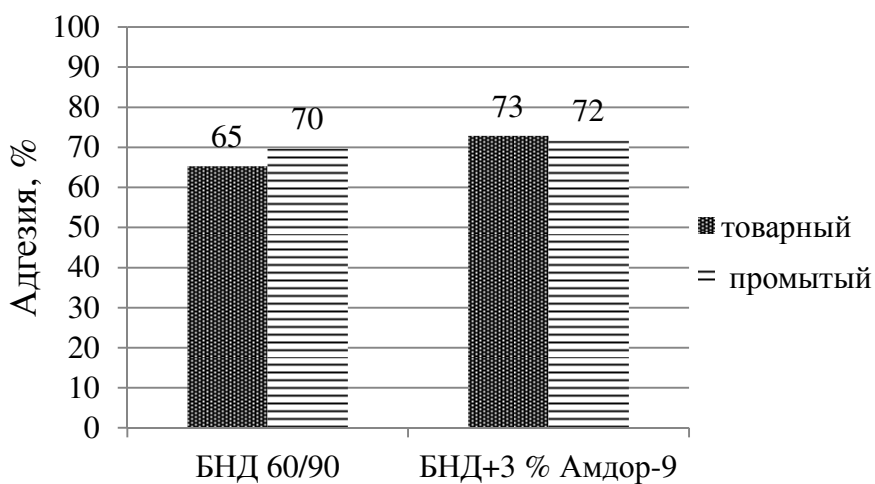


Рис. 3. Результаты определения адгезии битумных вяжущих к щебню из габбро-диабазы

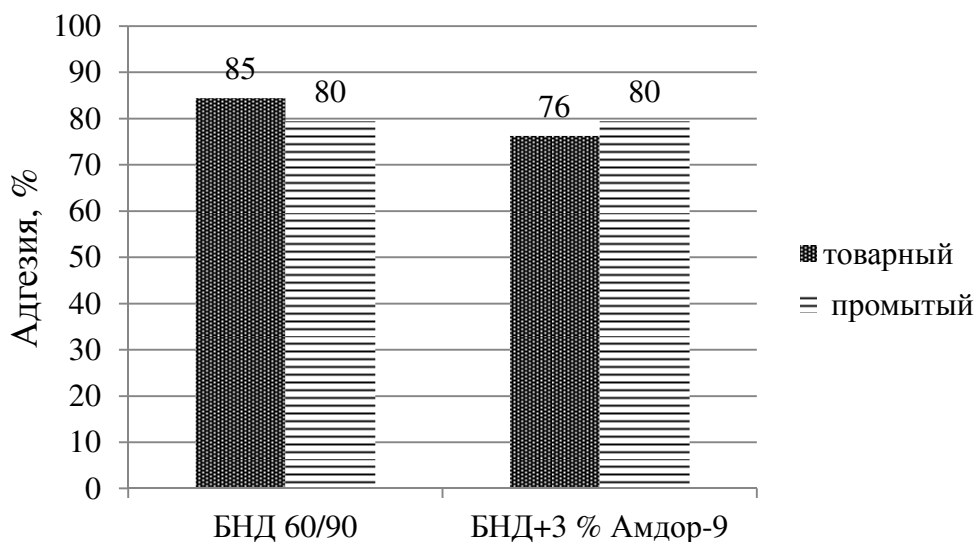


Рис. 4. Результаты определения адгезии битумных вяжущих к щебню из сталеплавильного шлака

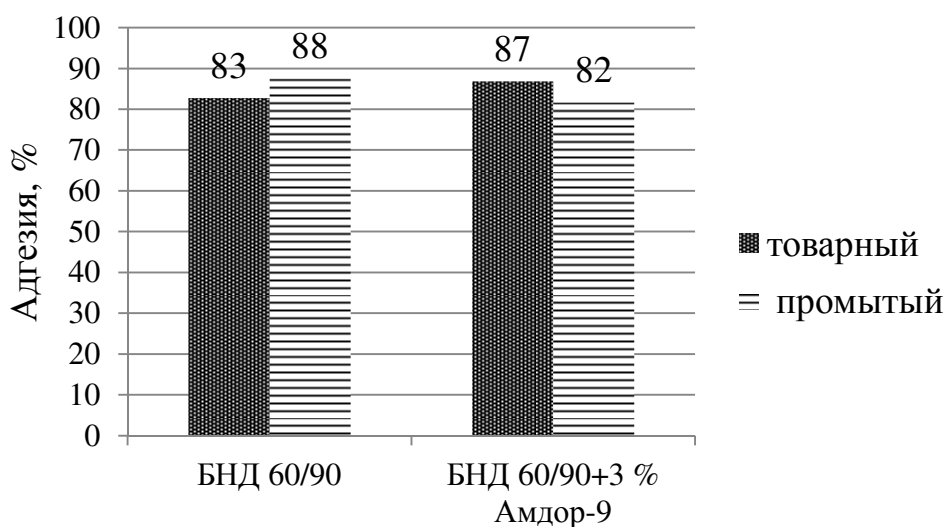


Рис. 5. Результаты определения адгезии битумных вяжущих к щебню из доменного шлака

По результатам определения отчетливо видно, что адгезия чистого битума к поверхности щебня из гранита очень низкая, но при введении добавки адгезия резко повышается. Для габбро-диабаз влияние адгезионной добавки не столь очевидно, так как мы наблюдаем уже высокую адгезию между чистым битумом и каменным материалом. В случае сталеплавильного и доменного шлаков также можно увидеть высокую адгезию чистого битума без введения адгезионной добавки.

Можно сделать вывод о том, что в случае габбро-диабаз, сталеплавильного и доменного шлака нет необходимости использовать адгезионную добавку, что значительно удешевляет стоимость ямочного ремонта.

Заслуживают особого внимания полученные нами результаты по влиянию степени чистоты на адгезионные свойства. Для всех композиций битума (модифицированного битума) с поверхностью щебня из природного и техногенного каменного материала

практически отсутствует отрицательное влияние пылеватых примесей каменного материала на величину адгезии по сравнению с чистым щебнем. Это дает основание исключить в перспективе из технологического процесса поверхностной обработки автомобильных дорог затратную и трудоемкую операцию промывки щебня.

Исследование показало низкую адгезию немодифицированного битума БНД 60/90 к поверхности щебня из гранита. Для компенсации этого недостатка необходимо обязательное введение в битум адгезионной добавки. В нашем случае была использована адгезионная добавка «Амдор-9».

В заключение следует отметить, что авторами:

1. Исследован композиционный материал для поверхностной обработки покрытия автомобильных дорог на основе щебня из природного и техногенного каменного материала с одной стороны и битума (модифицированного битума) с другой.

2. Впервые экспериментально определена с точностью до 1 % величина адгезии модифицированного битума БНД 60/90 с добавкой «Амдор-9» к поверхности природных и техногенных щебеночных каменных материалов.

3. Показано, что чистый битум марки БНД 60/90 имеет низкую величину адгезии к кислой горной породе, какой является гранит. Введение добавки адгезионной добавки «Амдор-9» увеличивает величину адгезии с 28 % до 72 % в случае товарного щебня (более чем в 2,5 раза).

4. Показана хорошая адгезия битума БНД 60/90 без адгезионной добавки к поверхности щебня из габбро-диабазы, сталеплавильного и доменного шлаков. Это позволяет исключить применение добавки «Амдор-9» и снизить стоимость ямочного ремонта.

## Литература

1. Шорин, В. А. Использование спектрофотометрической и компьютерной диагностики для определения качества сцепления в системе «битум – каменный материал» / В. А. Шорин, С. В. Припорова // Актуальные проблемы современного дорожного хозяйства : материалы Всероссийской научно-практической конференции / ВоГТУ. – Вологда, 2002. – С. 123–126.

2. ГОСТ 11508-74. Битумы нефтяные. Методы определения сцепления битума с мрамором и песком (с изменениями № 1, 2) : официальный сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200006476> (дата обращения: 29.08.2022). – Текст : электронный.

3. Рекомендации по устройству дорожных покрытий с шероховатой поверхностью : введен 05.01.2004. – Москва : Минтранс РФ. – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/47/47672/> (дата обращения: 29.08.2022). – Текст : электронный.

*V.A. Shorin, A.Y. Velsovsky*  
*Vologda State University*

## RESEARCH ON ADHESIVE BONDS IN COMPOSITE MATERIAL FOR ROAD SURFACE TREATMENT TECHNOLOGY

This work is devoted to the study of adhesive bonds in a composite material based on natural crushed stone from granite and gabbro-diabase and crushed stone from steelmaking and blast furnace slag for surface treatment of road surfaces. The main methodological tool for solving this problem was the use of a modern research method, in particular, the spectrophotometric method for determining the amount of adhesion of ordinary and modified petroleum road bitumen to the surface of crushed stone made of natural and man-made materials. For the first time, a study of adhesive bonds in a composite material based on crushed stone from natural and man-made materials in combination with modified bitumen was carried out.

Adhesive bonds, composite material, bitumen, modified bitumen, road, surface treatment, crushed stone from steel slag.



*А.И. Домаков, А.Г. Кузьмин,  
С.В. Турыгин, М.Ф. Умаров  
Вологодский государственный университет*

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В МЕМБРАНЕ КЛЕТКИ

В данном исследовании разрабатывается модель мембраны клеток в виде поляризованного диэлектрика. Обсуждается подход к решению задачи о межклеточном информационном взаимодействии, в основе которого электрические силы вызывают притягивание или отталкивание клеток. Установлено образование положительной обратной связи в процессе скоростной модуляции и модуляции по плотности ионов в инверсионном слое поляризованного диэлектрика.

Мембрана клетки, генерация колебаний, ионы, колебательная система, добротность, акустоэлектрическое поле.

В настоящее время все многообразие систем материального мира зарождается и развивается под управляющим воздействием, требующим определенных затрат энергии. В частности, биологическая клетка как система в планетарных условиях зарождается и развивается при гравитационном и электромагнитном воздействии. Из сравнения сил гравитационного и электрического воздействия на ионы, образующие молекулы клеток, следует, что гравитационные поля планеты не оказывают управляющего воздействия на процессы в клетках. Все процессы в клетках в конечном счете протекают под управляющим воздействием электрических и магнитных полей. При постоянных электрическом и магнитном полях движение иона описывается следующим векторным уравнением:

$$m\vec{a} = \vec{F}_{эл} + \vec{F}_M = q[\vec{E} + (\vec{V} \times \vec{B})], \quad (1)$$

где  $m$  – масса иона, двигающегося с ускорением  $\vec{a}$ ;  $q$  – электрический заряд иона, равный по абсолютной величине заряду электрона (протона).

В уравнении движения (1) векторное произведение  $(\vec{V} \times \vec{B})$  определяет  $\vec{F}_M$  – силу, действующую на ион в магнитном поле. Эта сила, равная по модулю

$$F_M = VB \sin \alpha, \quad (2)$$

пропорциональна скорости движения иона ( $V$ ) в магнитном поле, магнитной индукции ( $B$ ), и  $\sin \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{V}$  и  $\vec{B}$ .

После деления левой и правой частей уравнения (1) на массу частицы и введения параметра  $\eta = q/m$  уравнение примет вид:

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \eta\vec{E} + \eta(\vec{V} \times \vec{B}) = \eta\vec{E} + \eta \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix}, \quad (3)$$

где  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – единичные орты;  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$  – производные по времени (составляющие вектора скорости по координатам);  $B_x, B_y, B_z$  – составляющие вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  по координатам декартовой системы.

Уравнение (3) есть уравнение движения иона в постоянном электрическом и магнитном полях.

Первое слагаемое в уравнениях (1) и (3) определяет силовое воздействие электрического поля на ион, приводя его в движение. При этом энергия поля преобразуется в кинетическую энергию иона:

$$W_k = \frac{mv^2}{2} = qU, \quad (4)$$

где  $U = |\varphi_1 - \varphi_2|$  – разность потенциалов в двух точках траектории движения иона. Из (4) следует

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}. \quad (5)$$

Второе слагаемое в (1) и (3) есть воздействие магнитного поля на движущийся ион. Это воздействие не изменяет энергии иона, но влияет на его траекторию движения. Таким образом, в постоянных полях магнитное воздействие порождается электрическим воздействием на ионы клеток живых организмов.

В состоянии покоя наружная сторона мембраны клетки заряжена положительно, а внутренняя – отрицательно. Для большинства клеток потенциал покоя составляет от  $-60$  до  $-100$  мВ [1, 2]. При возбуждении клетки наружная и внутренняя стороны мембраны изменяют знаки зарядов на противоположные. Происходит деполяризация клетки. При этом потенциал может составлять для различных клеток от  $+20$  до  $+40$  мВ, а длительность состояния деполяризации клетки составляет до  $0,5$  с. При переходе от состояния покоя через деполяризацию обратно в состояние покоя вырабатывается импульс амплитудой от  $100$  до  $120$  мВ. В отсутствии стимула клетка находится в состоянии покоя, то есть является поляризованной. На ионы внутри клетки действует постоянное электрическое поле, в основном сосредоточенное в мембране, и по-

стоянное магнитное поле Земли. Кроме того, постоянное магнитное поле может быть создано дополнительно с помощью приборов или другим естественным или искусственным образом.

Мембрана по отношению к внутриклеточной и внеклеточной областям обладает свойствами диэлектриков, а указанные области – свойствами электролитов. В силу большого омического сопротивления вещества мембраны (от  $10^2$  до  $10^5$  Ом·см<sup>2</sup>) и электрической емкости от 0,5 до 1,3 мкФ·см<sup>-2</sup> электрическое поле, сосредоточенное в мембранах, может достигать значений от  $3,3 \cdot 10^6$  до  $1,7 \cdot 10^6$  В/м, близких к электрическому пробое.

Процессы перемещения электрических зарядов в мембранах определяются поляризацией диполей (рис. 1).

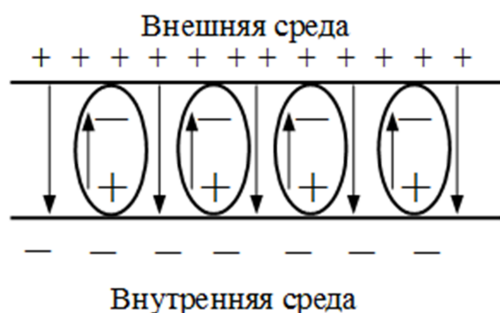


Рис. 1. Схематическое изображение сечения мембраны: поляризация диполей внешним полем, внутреннее поле диполя направлено встречно внешнему полю

При упругой дипольной поляризации время установления поляризации составляет от  $10^{-12}$  до  $10^{-16}$  секунды. При изменении внешнего электрического поля во времени изменятся и поляризационный ток, при этом часть электрической энергии преобразуется в тепловую энергию, выделяемую в процессе поворота диполей в направлении силовых линий внешнего поля.

### 1. Построение модели для описания процессов в мембране и прилегающих к ней областях

Модель представляет собой частотно-зависимую структуру с неоднородностями, соответствующими клеточным мембранам биологических объектов, с широким спектром тепловых шумов, вызванных колебаниями связанных зарядов (электрических диполей). В силу разности электрических потенциалов с внешней и внутренней сторон мембраны и ионной проводимости в примыкающих областях к мембране, в ней сосредоточено электрическое поле. Это поле поляризует вещество мембраны, по свойствам относящееся к диэлектрику. Принята упругая поляризация, при которой диполь возвращается в исходное состояние при снятии внешнего электрического воздействия.

Среднее статистическое значение тепловой скорости хаотического движения ионов в прилегающих к мембране областях находится из равенства кинетической и тепловой энергии:

$$\frac{mu^2}{2} = \frac{3}{2}kT. \quad (6)$$

В выражении (6)  $m$  – масса иона,  $u$  – его средне-статистическое значение скорости,  $T$  – абсолютная

температура,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

В таблице приведены массы некоторых ионов, наиболее характерных для клеток биологических тканей. Массы приведены в атомных единицах (а.е.м.),  $1 \text{ а.е.м.} \approx 1,66 \cdot 10^{-27}$  кг.

Таблица

Массы ионов

Ионы	А.е.м.	Ионы	А.е.м.
Водород	1,00797	Натрий	22,9898
Кислород	15,9994	Калий	39,102
Углерод	12,01115	Кальций	40,080
Азот	14,0067	Цинк	65,370
Хлор	35,4530	Железо	55,847
Фтор	18,9984	Магний	24,305

В силу того, что разность потенциалов с внутренней и внешней сторон мембран создают ионы натрия ( $\text{Na}^+$ ), ионы хлора ( $\text{Cl}^-$ ), ионы калия ( $\text{K}^+$ ), приведем их тепловые скорости при  $T = 310$  К:  $u(\text{Na}^+) = 579,78$  м/с;  $u(\text{Cl}^-) = 467$  м/с;  $u(\text{K}^+) = 444,67$  м/с.

Тепловые скорости ионов калия и хлора близки. Эти ионы проникают через мембрану в состоянии покоя во внутреннюю область. Ионы натрия, скорость которых существенно больше, в состоянии покоя мембраны практически не проходят через мембрану внутрь клетки. Проницаемость ионов натрия в 50–100 раз меньше проницаемости ионов калия [1, 2].

Таким образом, в состоянии покоя с внутренней стороны мембраны электролит состоит в основном из ионов с примерно равными средними значениями тепловых скоростей.

Под действием электрического поля, сосредоточенного в мембране клетки, ионы с отрицательным зарядом образуют инверсионный слой, пограничный с внутренней поверхностью мембраны (рис. 2).

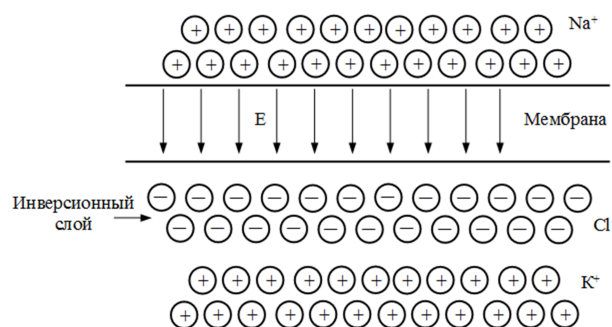


Рис. 2. Образование инверсионного слоя из ионов  $\text{Cl}^-$  в состоянии покоя мембраны клетки

При возбуждении клетки мембрана становится проницаемой для ионов натрия ( $\text{Na}^+$ ). Через ионные каналы ионы калия ( $\text{K}^+$ ) стремятся покинуть клетку из-за разности концентрации внутри и снаружи клетки. В результате мембрана клетки деполяризуется, а с внутренней стороны ее образуется инверсионный слой из положительно заряженных ионов натрия и калия. В силу более высокой подвижности ионов натрия они будут преобладать в этом слое. Из-за низкой концентрации ионов хлора ( $\text{Cl}^-$ ) по сравнению с суммарной концентрацией ионов натрия и калия при-

граничный с внутренней стороны к мембране слой будет иметь положительный электрический заряд. Пиковое значение потенциала действия для большинства клеток достигает +20 мВ [1].

## 2. Стационарный процесс генерации акустоэлектрических колебаний в мембране клетки

Так как мембрана клетки представляет собой диэлектрическую упругую среду, то в ней при определенных условиях могут существовать акустические стоячие волны. Эти волны продольно-поперечные. Они изменяют толщину мембраны и, следовательно, напряженность электрического поля. В результате имеют место стоячие акустоэлектрические волны в мембране клетки (рис. 3).

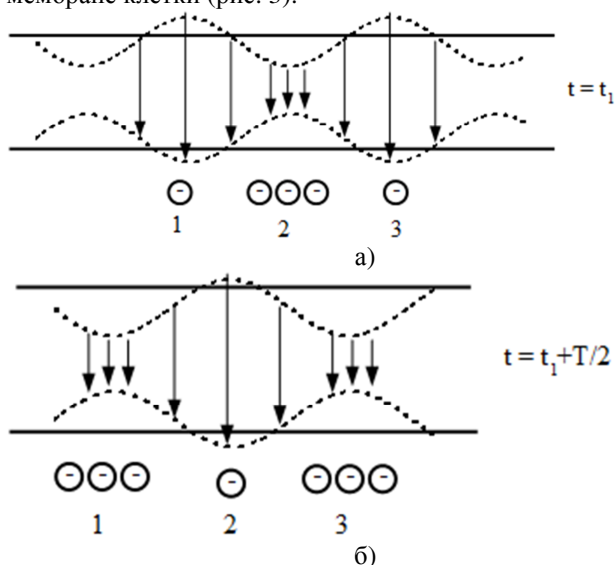


Рис. 3. Акустоэлектрическая волна в мембране:  
а) на момент времени  $t = t_1$ ,  
б) на момент времени  $t = t_1 + T/2$ ,  
где  $T$  – период гармонического колебания

В местах увеличения толщины мембраны (пучности) напряженность поля ( $E$ ) уменьшается, а при сжатии напряженность поля увеличивается. Изменяющееся электрическое поле вдоль мембраны модулирует в инверсионном слое заряды по плотности: в местах максимума электрического поля плотность зарядов выше, а в минимумах поля плотность ниже. Модуляция зарядов в инверсионном слое по плотности в свою очередь вызывает усиление акустической волны: ее амплитуда увеличивается под действием переменной во времени кулоновской силы. Усиливающиеся акустические колебания усиливают модуляцию инверсионного слоя по плотности. В результате реализуется положительная обратная связь, приводящая к устойчивой генерации акустоэлектрических колебаний в мембране клетки.

В процессе модуляции инверсионного слоя по плотности происходит движение ионов, например из областей 1 и 3 в область 2 (рис. 3а) и наоборот: из области 2 в области 1 и 3 (рис. 3б).

Участки мембраны типа 1, 2, 3 расположены по всей внутренней поверхности мембраны. На расстоянии длины волны ( $\lambda$ ) участки совершают колебания в фазе, например участки 1 и 3 на рисунке 3 синфазны.

Пусть имеет место  $N$  синфазных участков. Тогда коэффициент усиления всех участков, параллельно работающих на усиление акустоэлектрической волны, определяется из выражения:

$$\dot{K}(\omega) = \sum_{i=1}^N \dot{K}_i(\omega), \quad (7)$$

где  $\dot{K}(\omega)$ ,  $\dot{K}_i(\omega)$  – комплексные величины суммарного и  $i$ -го коэффициента (участка) усиления, зависящие от частоты  $\omega = 2\pi f$ . Используя показательную форму записи комплексной величины, выражение (7) примет вид:

$$K(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = \sum_{i=1}^N K_i(\omega)e^{j\varphi_i(\omega)}. \quad (8)$$

В выражении (8)  $K(\omega)$ ,  $\varphi(\omega)$  – соответственно амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристика мембраны как колебательной системы, в которой рождаются гармонические колебания.

На резонансной частоте всей колебательной системы резонансные частоты отдельных участков (ячеек) могут отличаться в силу неоднородностей в мембране. Тогда выражение (8) содержит случайные величины, где на резонансной частоте  $\omega_0$ :

$$K_i = K(1 + \Delta_i); e^{j\varphi_i} = e^{j\delta_i};$$

$$K(\omega_0)e^{j\varphi(\omega_0)} = K \sum_{i=1}^N (1 + \Delta_i)e^{j\delta_i}. \quad (9)$$

В выражении (9)  $\Delta$  и  $\delta$  – случайные величины:  $\Delta$  – амплитудная,  $\delta$  – фазовая ошибки на резонансной частоте.

Переход от ансамбля (выборки) к случайной величине дает следующее выражение:

$$K(\omega_0)e^{j\varphi(\omega_0)} = NK(1 + \Delta)e^{j\delta}. \quad (10)$$

При  $\Delta \ll 1$ :

$$K(\omega_0)e^{j\varphi(\omega_0)} = NK e^{\Delta + j\delta}. \quad (11)$$

Переход от выражений (8) и (9) к выражению (10) справедлив при  $N \gg 1$ , что имеет место в действительности [2] ( $N$  может составлять сотни и тысячи единиц). Тогда, согласно центральной предельной теореме в теории случайностей, величины  $\Delta$  и  $\delta$  имеют нормальный закон распределения, а их среднее значение равно нулю. Следовательно, на резонансной частоте возбуждения мембраны среднее статистическое значение коэффициента усиления

$$K(\omega_0) = NK > 1, \quad (12)$$

даже для значений  $0 < K < 1$ , где  $K$  – среднее статистическое значение усиления ячейки мембраны.

## 3. Процессы, определяющие усиление акустоэлектрической волны в мембране

Усиление энергии акустоэлектрической волны вызывают следующие два физических процесса:

- 1) преобразование энергии электрического поля в мембране в энергию акустоэлектрической волны;
- 2) преобразование тепловой энергии ионов в энергию акустоэлектрической волны.

Оба процесса связаны с кинетической энергией ионов. При ударе иона в мембрану ее толщина ( $d$ ) в точке удара уменьшается, а напряженность электрического поля вызывает дополнительный приток ионов к этому месту мембраны с двух ее сторон. Увеличение плотности электрического заряда на  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  с

внутренней и внешней сторон мембраны в области удара приведет к увеличению электрической силы давления в этой области на величину

$$\Delta F = \frac{\sigma_1 \sigma_2}{4\pi \epsilon_a d^2} (e^{2(\alpha + \delta)} - 1), \quad (13)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2$  – плотность распределения электрического заряда с внутренней и внешней сторон мембраны в состоянии покоя (до удара иона);  $\alpha_1 = \frac{\Delta_1}{\sigma_1}$ ;  $\alpha_2 = \frac{\Delta_2}{\sigma_2}$ ;  $\alpha_1 \approx \alpha_2 = \alpha$ ;  $\Delta$  – уменьшение толщины мембраны в точке удара при максимальном сжатии;  $\delta = \frac{\Delta}{\alpha} \ll 1$ ;  $\epsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость мембраны.

Используя связь приведенной емкости мембраны  $C = \epsilon_a/d$ , получим значение  $\epsilon_a \approx (5 \dots 7) \cdot 10^{-6}$  Ф/см.

Из (13) следует, что в точке удара иона электрическая сила сжатия будет в  $2(\alpha + \delta)$  раза больше, чем до удара. В предположении, что  $\alpha \ll 1$  и  $\delta \ll 1$ , превышение этой силы лежит в пределах

$$0 < 2(\alpha + \delta) \ll 1. \quad (14)$$

Действие электрической силы направлено на дополнительное сжатие мембраны, то есть на совершение работы и увеличение запаса электрической энергии в этой локальной точке.

#### 4. Межклеточные силы взаимодействия

Клетка каждого органа генерирует спектр акустоэлектрических колебаний. Спектральный состав гармонических колебаний определяется различием органов сложного биологического объекта.

При взаимодействии клеток одного и того же органа или клеток разных органов одного и того же биологического объекта генерируются когерентные акустоэлектрические колебания с одинаковой начальной фазой. В результате имеет место действующее значение электрического поля одного знака с внешней стороны мембраны. При сближении клеток возникают силы отталкивания, обратно пропорциональные квадрату расстояния между клетками.

При попадании в организм биологического объекта инородных тел (антител) акустоэлектрические колебания клеток в этих антителах наводят когерентные противофазные колебания. В результате действующие значения электрических полей клетки и антитела будут противоположных знаков. Возникает электрическая сила притяжения, обратно пропорциональная квадрату расстояния между клетками.

Отдельные, достаточно большие клетки (макрофаги), обладают способностью поглощать антитела.

#### 5. Резонансные системы гидрофильных головок

Гидрофильные головки с внешней и внутренней сторон мембраны образуют периодические структуры. Стоячие акустоэлектрические волны в мембране можно рассматривать как две встречно бегущие акустические волны [3]. Образование сгустков и разрежений ионов в инверсионном слое (рис. 3) образуют в этом случае два встречных потока ионов. Каждый поток взаимодействует со своей волной. При скорости волны, близкой скорости движения ионов в ин-

версионном слое, происходят следующие два процесса:

1) увеличение энергии акустоэлектрической волны при скорости ионов несколько больше скорости волны. Такой эффект подобен магнетронному при представлении гидрофильных головок резонаторами;

2) увеличение кинетической энергии ионов при скорости волны несколько большей скорости ионов. Эффект ускорения заряженных частиц.

Первый процесс – преобразование энергии электрического поля мембраны в энергию акустоэлектрической волны. Второй процесс – преобразование части энергии этой волны в кинетическую энергию ионов (увеличение скорости). Оба процесса вызывают скоростную модуляцию ионов в инверсионном слое, переходящую в модуляцию по плотности (рис. 3). В стационарном процессе устанавливается равенство между приращением энергии акустоэлектрической волны и затратой волны на приращение кинетической энергии ионов.

Частота акустоэлектрических колебаний определяется периодом гидрофильных головок. При л-возбуждении (поля в местах соседних головок противофазны) длина волны равна удвоенному периоду. В этом случае имеет место самая высокая частота генерируемых акустоэлектрических колебаний:

$$f = V/\lambda, \quad (15)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $V$  – ее скорость.

Периодичность структуры гидрофильных головок может быть кратна наименьшему периоду. В этом случае резонансные частоты кратно уменьшаются по сравнению с наивысшей частотой. Наличие множества резонансов в мембране клетки подтверждается экспериментальными исследованиями [4]. Экспериментальные зависимости показывают уменьшение биологического эффекта с уменьшением резонансной частоты (увеличением длины волны внешнего ЭМИ) [5]. Это явление можно объяснить уменьшением числа элементарных колебательных систем в выражении (7).

#### 6. Взаимодействие ионов инверсионного слоя с акустоэлектрической волной

Принимая статистическое максвелловское распределение ионов по скоростям, приходим к скоростной модуляции ионов. Так, например ионы с меньшей скоростью, чем скорость акустоэлектрической волны, забирают часть энергии волны, увеличивая скорость. Ионы с большей скоростью, наоборот, увеличивают энергию волны, при этом их кинетическая энергия и, следовательно, скорость уменьшаются. В результате число ионов, скорость которых несколько превышает скорость волны, возрастает. Движение этих ионов должно быть в тормозящей фазе акустоэлектрической волны. При этом условии уменьшение кинетической энергии ионов увеличивает энергию волны.

Учитывая несимметричность максвелловского распределения ионов по скоростям в область больших скоростей относительно максимума функции распределения, скоростная модуляция имеет положительный энергетический баланс для волны [6].

Отсортированные ионы по скорости модулируются по плотности электрическим полем (рис. 3). Плотность ионов в тормозящую и ускоряющую фазы акустоэлектрической волны разная: в тормозящую больше, чем в ускоряющую. В результате происходит усиление стоячей акустоэлектрической волны (увеличение энергии).

#### **Заключение**

Таким образом, мембрану клетки следует рассматривать как некоторую резонансную колебательную систему, охваченную положительной обратной связью, генерирующую акустоэлектрические стоячие волны. Положительная обратная связь реализуется через модуляцию ионов инверсионного слоя по скорости и плотности. При этом нарастание амплитуды стоячей волны ограничивается упругими свойствами вещества мембраны. В процессе генерации акустоэлектрических стоячих волн в мембране преобразуются следующие виды энергии: энергия квазиэлектрического поля в мембране и кинетическая энергия ионов инверсионного слоя. Представление стоячей волны в виде встречных бегущих волн есть модель анализа процессов генерации колебаний в мембране.

Резонансную систему мембраны следует рассматривать как совокупность элементарных колебательных систем, образованных парой соседних гидрофильных головок. При этом поля двух соседних элементарных колебательных систем противофазны (рис. 3). Каждая элементарная колебательная система охвачена положительной вышеуказанной обратной связью. Элементарные усилительные (генераторные)

ячейки работают параллельно. Общий коэффициент усиления есть сумма (7).

Синфазность излучения всеми одинаковыми клетками биологического объекта может создавать достаточно высокую для регистрации плотность потока энергии. Измерение плотности потока энергии производится с целью интегральной оценки состояния биологического объекта.

#### **Литература**

1. Рангайян, Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Р. М. Рангайян ; перевод с английского под редакцией А. П. Немирко. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 440 с.
2. Волькенштейн, М. В. Биофизика / М. В. Волькенштейн. – Москва : Лань, 2012. – 608 с.
3. Домаков, А. И. Радиофизическая модель резонансных явлений в липидных мембранах клеток / А. И. Домаков, А. Г. Кузьмин, С. В. Турыгин // Вестник Российской военно-медицинской академии. – 2017. – Вып. 4 (60). – С. 104–110.
4. Девятков, Н. Д. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности / Н. Д. Девятков, М. Б. Голант, О. В. Бецкий. – Москва : Радио и связь, 1991. – 160 с.
5. Scott, H. L. Modeling the Lipid Component of Membranes / H. L. Scott // Curr. Opin. Struct. Biol. – 2002. – Vol. 12, № 4. – P. 495–502.
6. Романов, А. М. Анализ существующих биофизических представлений процессов клеточных мембран / А. М. Романов // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 1–7. – С. 1122–1125.

*A.I. Domakov, A.G. Kuzmin, S.V. Turygin, M.F. Umarov  
Vologda State University*

#### **DEVELOPMENT OF A MODEL TO DESCRIBE PROCESSES OCCURRING IN CELL MEMBRANE**

In this paper a model of a membrane in the form of a polarized dielectric is developed. An approach to solving the problem of intercellular information interaction, based on which electrical forces cause the attraction or repulsion of cells, is discussed. The formation of a positive feedback in the process of velocity modulation and ion density modulation in the inversion layer of a polarized dielectric is determined.

Cell membrane, oscillation generation, ions, oscillatory system, Q-factor, acoustoelectric field.



## **УПРАВЛЕНИЕ ПОРТФЕЛЕМ ПРОГРАММНЫХ ПРОЕКТОВ НА ОСНОВЕ АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА**

Целью исследования, представленного в статье, является разработка архитектуры интеллектуального агентно-ориентированного программного комплекса для управления портфелем проектов организации-разработчика программных продуктов. Проведен анализ действующих стандартов и методик, особенностей управления портфелем программных проектов и доступных автоматизированных средств управления. В ходе исследования разработана и обоснована концептуальная архитектура сообщества интеллектуальных информационных агентов. Определены характеристики основных классов агентов сообщества, объектов управления, отношений между агентами и действий агентов, виды решаемых ими задач. Выбрана платформа для реализации программного комплекса.

Архитектурная модель, интеллектуальный информационный агент, портфель проектов, система подготовки и принятия решений, управление проектами.

Управление портфелем программных проектов (Project Portfolio Management, PPM) современной фирмы-разработчика представляет собой весьма сложную задачу, поскольку ресурсы фирмы, как правило, ограничены, проекты динамичны, их потребности в ресурсах и поддержке со стороны инфраструктуры постоянно меняются при реализации жизненного цикла проекта. Изменчивы по разным обстоятельствам и приоритеты отдельных проектов в портфеле. Для планирования и управления проектами обычно используются традиционные программные средства, позволяющие строить и контролировать графики проектных работ и ресурсов, планировать вехи и пакеты работ проектов и их продолжительность, однако они, как правило, не поддерживают подготовку и согласование изменений приоритетов проектов, оптимизацию распределения ресурсов. Эти задачи по-прежнему решаются вручную, и существенное влияние на принятие решений часто оказывают не объективные характеристики отдельных проектов, а субъективные факторы. Повысить оперативность и объективность управления портфелем проектов могут системы поддержки принятия решений (далее – СППР), реализованные на основе агентного подхода.

Целью исследования является построение архитектурной модели СППР по управлению портфелем программных проектов на основе технологий интеллектуальных информационных агентов.

Задачи исследования:

- изучение результатов исследований, стандартов и методик в сфере управления портфелями программных проектов;

- исследование возможностей существующих СППР по управлению портфелями программных проектов;

- построение архитектурной модели СППР по управлению портфелем программных проектов на основе технологий интеллектуальных информационных агентов.

ГОСТ Р 54870-2011 [2] определяет терминологию предметной области управления портфелями проектов и представляет общие рекомендации по организации управления портфелем проектов относительно основных процессов управления, ролей участвующих в них лиц, особенностей подготовки и принятия решений.

Управление портфелем проектов фирмы, ведущей разработку программных продуктов, предполагает его формирование на основе договоров с заказчиками, определение критериев принятия решений, расстановку и изменение приоритетов отдельных проектов в зависимости от ценности проекта для фирмы, распределение ресурсов фирмы между проектами (балансирование портфеля). Основные экономические критерии принятия решений по управлению портфелем проектов рассмотрены в [3], к ним следует добавить допустимые риски и показатели технического уровня проектов, оценки квалификации и опыта исполнителей, объемы технического долга и решений для повторного использования в будущем, степень использования производственной инфраструктуры и проч.

Среди особенностей программных проектов по сравнению с проектами в традиционных отраслях можно выделить сложность оценки трудоемкости и стоимости проекта, соблюдения авторских прав и подтверждения соответствия программного продукта, гарантирования его качества, необходимость управления величиной технического долга и объемом решений для повторного использования в проектах. При объединении проектов в портфель эти особенности проявляются еще более четко и значимо.

Сложность оценки трудоемкости и стоимости проекта вытекает из сложности самого программного продукта, многовариантности архитектурных и технологических решений, особенностей предметной области применения продукта, средств разработки, опыта команды и проч. Существует два базиса оценки: по объему кода и по сложности структур данных, интерфейсов и процедур продукта, и соответствующие им методики, которые применительно к конкретному проекту дают обычно существенно различные результаты [8].

Под техническим долгом в программной инженерии понимается компромиссное в смысле сроков разработки и качества результата решение, когда с ведома заказчика (а иногда и без такового) разработчики предлагают быстрое, но не оптимальное, часто недостаточно верифицированное техническое решение, доработка которого планируется позднее. Объем и стоимость такой доработки и определяет величину долга, который, например при снижении приоритета проекта в портфеле, может в итоге оказаться не закрытым и перейти с фазы разработки продукта на фазу его сопровождения.

Отдельно необходимо отметить тот факт, что, наряду с классическими моделями управления проектами, к которым относятся каскадная и инкрементная модели, при управлении программными проектами все шире применяются современные методики, присутствующие в отрасли программной инженерии. Среди них: модель быстрой разработки приложений Rapid Application Development (RAD), методика RUP фирмы Rational Software, методика Microsoft Solutions Framework (MSF), методика гибкой разработки, такие как SCRUM. Необходимость объединения в портфель проектов, выполняемых по разным методикам, создает дополнительные трудности для его балансировки по срокам, ресурсам и бюджетам.

Наряду с ГОСТ Р 54870-2011, при управлении портфелями проектов следует использовать ГОСТ Р ИСО 21500-2014, ГОСТ Р ИСО 21504-2016, а для программных проектов – ISO/IEC/IEEE 12207:2017, ГОСТ Р 57101-2016, ГОСТ Р 57193-2016. Полезны для организации управления портфелями проектов и оценки степени ее совершенства такие источники, как PMBoK v.6, SWEBoK v.4, PMI Organizational Project Management Maturity Model (OPM3), SW-CMM Capability Maturity Model for Software. Проблема в том, что практическое применение совокупности этих стандартов в рамках проектной фирмы требует их адаптации к особенностям фирмы и предметной области программного продукта, профилирования и компетентного сопровождения.

Задачи планирования и управления проектами давно и успешно решаются различными программными системами. Возможности существующих популярных систем управления проектами (далее – СУП) рассмотрены автором в [8]. При решении задач управления портфелем многие СУП позволяют изменять масштабы проектов, объемы работ, учитывать конкуренцию за ресурсы, допускают различия в настройках и рабочих процессах по каждому проекту

портфеля, предлагают формы интегральной отчетности. Такие продукты, как Asana, Jira, Microsoft Project, Wrike в наиболее полных версиях предоставляют общие функции управления портфелем проектов как сложным объектом со своими параметрами, но не имеют инструментов оптимизации назначения приоритетов проектов, балансировки ресурсов и сопоставительного анализа вариантов решений, что осложняет управление портфелем программных проектов.

Исследования в области агентно-ориентированного подхода ведутся в нашей стране и за рубежом несколькими научными школами. В рамках настоящего исследования использованы работы, решающие фундаментальные [1, 7] и прикладные [4] проблемы развития интеллектуальных агентных систем, применения агентного подхода в СППР. Отсутствие защит кандидатских и докторских диссертаций по данной тематике с 2010 года говорит не об угасании интереса к теме, который вполне очевиден, а скорее, о завершении процессов становления научных школ по данному направлению, переходу исследований в более практическую плоскость и, отчасти, о сокращении притока молодых кадров в науку в нашей стране.

Анализ возможностей агентных технологий при организации управления портфелем программных проектов позволяет выделить следующие их достоинства:

- между различными классами агентов можно четко распределить цели, полномочия и функции, а также права доступа к информации по управлению портфелем, что дает возможность минимизировать функциональность и структурную сложность решения в рамках каждого класса;

- наряду с активно участвующими в процессах управления портфелем агентами, могут быть использованы агенты ресурсов, компонентов инфраструктуры и прочие, в результате образуется сложно структурированное сообщество интеллектуальных информационных агентов;

- возможность разработки и отладки каждого класса агентов в общей технологической среде проектирования и реализации позволяет преодолеть высокую сложность разработки, тестирования и управления СППР в целом.

Вне зависимости от предметной области проектов для управления портфелем по рекомендации [2] должны быть реализованы следующие роли:

- комитет управления портфелем проектов – коллегиальный орган, принимающий решения по составу портфеля, приоритетам проектов, перераспределению ресурсов между проектами, согласованию календарей и проч.;

- руководитель портфеля – лицо, ответственное за текущее управление портфелем проектов и отчетывающееся перед комитетом управления портфелем проектов;

- офис управления портфелем для выполнения технических задач по управлению.

Для каждого из проектов портфеля должна быть сформирована своя организационная структура управления, в которой обычно выделяют роли руко-

водителя проекта, архитектора системы и администратора проекта. Среди многочисленных функций этих ролей в отношении управления портфелем можно выделить:

- для руководителя проекта – запрос и распределение ресурсов проекта, учет их использования и передачи в другие проекты, взаимодействие с заказчиком и обеспечение коммуникаций, отчетность по проекту;

- для архитектора системы – обоснование потребности в ресурсах, обеспечение качества проектных решений и передачи результатов заказчику;

- для администратора проекта – контроль графиков и событий, обеспечение документооборота по проекту.

При нормальном ходе выполнения проекта его интересы в системе управления портфелем представляет агент руководителя проекта, агенты архитектора системы и администратора проекта могут активироваться в чрезвычайных ситуациях, например при неисполнении руководителем проекта своих обязанностей. Если проект сложный и нагрузка на руководителя высока, возможно участие агента администратора проекта и в нормальном режиме (например, представление текущей отчетности по проекту агенту контроля).

Основные классы агентов СППР:

- агенты членов комитета управления портфелем проектов;

- агент руководителя портфеля;

- агенты сотрудников офиса управления портфелем;

- агенты руководителей отдельных проектов;

- агенты ресурсов и компонентов инфраструктуры;

- агент арбитража.

Основные классы объектов:

- портфель проектов с атрибутами (структура портфеля, ограничения портфеля, категории компонентов, показатели портфеля);

- проекты с атрибутами (статус в портфеле, параметры оценки, методики оценки, интегральный показатель привлекательности);

- графики проектов и ресурсов;

- отчеты об исполнении;

- запросы на изменения;

- управленческие решения.

Агенты СППР используют общую информацию из хранилища данных о миссии фирмы, ее стратегических целях и приоритетах в части управления портфелем; информацию о конъюнктуре рынков продуктов, рабочей силы, средств разработки и прочих ресурсов; нормативные, регламентные и распорядительные документы и проч.

Задачи СППР по рекомендациям [2] можно объединить в несколько групп:

- задачи обеспечения управления, включая сбор и анализ требований к портфелю проектов, формализацию процедур управления и критериев оценки портфеля;

- задачи формирования портфеля, включая идентификацию и оценку компонентов, расстановку приоритетов, оптимизацию по заданным критериям и

балансировку портфеля по срокам и ресурсам, назначение владельцев портфеля и отдельных проектов;

- задачи мониторинга и контроля хода реализации портфеля проектов, управления изменениями в структуре портфеля, сроках и ресурсах отдельных проектов.

Множество отношений между агентами может быть представлено в виде матрицы, связывающей классификаторы процессов до уровня задач и агентов до конкретных экземпляров класса, а виды отношений между ними диктуются ролью агента в конкретном процессе.

Множество допустимых действий агентов формируется на основе операций над объектами, в которых участвует агент, в соответствии с описанной выше матрицей отношений.

Среда, в которой существуют агенты и объекты, и конкретные варианты их реализации определяются выбранной мультиагентной платформой.

Рассмотрим для примера конфигурацию агента сотрудника офиса управления портфелем, выполняющего функцию контроля реализации портфеля проектов (далее – агент контроля). Этот агент участвует в процессе контроля реализации портфеля проектов, взаимодействуя с агентами руководителей отдельных проектов, агентами ресурсов, компонентов инфраструктуры и агентом руководителя портфеля.

Цель агента контроля в СППР соответствует цели процесса: оперативное выявление отклонений текущих показателей от плановых показателей портфеля и обеспечение корректирующих действий для их устранения.

Входы процесса:

- плановые показатели портфеля, данные о распределении бюджетов и ресурсов между проектами;

- характеристики проектов (статус, параметры оценки);

- методики и регламенты оценки;

- графики проектов и ресурсов;

- отчеты об исполнении проектов;

- запросы на изменения от руководителей проектов.

Выходы процесса в соответствии с [2]:

- a) отчеты об исполнении компонентов портфеля и портфеля в целом;

- b) запросы на изменения портфеля проектов;

- c) управленческие решения по внесению изменений в состав компонентов портфеля, изменению приоритетов компонентов, распределению ресурсов, по корректировке отдельных компонентов, рекомендации по изменению методики управления портфелем.

Каждый выход процесса формируется в результате решения агентом контроля определенной задачи либо в интерактивном режиме взаимодействия с владельцем агента (например, формирование запроса на изменение портфеля проектов, формирование рекомендации по изменению методологии управления портфелем), либо автоматически (например, формирование запросов о ходе выполнения проектов к агентам руководителей проектов или формирование отчета об исполнении компонентов портфеля и портфеля в целом для агента руководителя портфеля). Полномочия по принятию

управленческих решений по умолчанию остаются за владельцами агентов в соответствии со схемой распределения полномочий в фирме, сами агенты формируют проекты таких решений.

Модель отношений агента контроля может быть формализована на уровне контракта, официальных полномочий и ответственности, характеристик ролей в деловых процессах и владения объектами.

При конфигурировании агента контроля задаются права доступа к компонентам хранилища данных СППР либо интерфейс с агентом, ведущим это хранилище, набор текущих показателей портфеля для контроля, допустимые диапазоны отклонений показателей от плановых, набор доступных корректирующих действий, библиотека сценариев (планов) действий и режимы взаимодействия с владельцем.

Процесс контроля реализации портфеля проектов выполняется с определенной при конфигурировании агента циклическостью или может запускаться асинхронно по мере возникновения событий, требующих реагирования.

На рисунке представлен эскиз модели среды взаимодействия агента контроля.

Поток 1 к агенту контроля состоит из набора значений параметров конфигурации агента и сигналов управления (например, запрос информации о состоянии какого-либо ресурса или компонента инфраструктуры); от агента контролеру – ответы на запросы, периодическая информация о состоянии портфеля, сигналы о выявленных запросах и отклонениях.

Поток 2 к агенту контроля состоит из запросов информации о состоянии портфеля, от агента контроля – ответы на запросы и периодическая информация о состоянии портфеля.

Потоки 3, 4 и 5 состоят из запросов агента контроля о состоянии проекта, ресурса или компонента инфраструктуры и ответов на эти запросы.

Поток 6 от хранилища к агенту состоит из исторической информации о состоянии портфеля, отдель-

ных проектов, ресурсов и компонентов инфраструктуры фирмы, в обратном направлении – результаты мониторинга портфеля.

Агент контроля ведет мониторинг параметров отдельных проектов, состояния ресурсов (людские, финансовые, материальные и проч.) и компонентов инфраструктуры (например, центра обработки данных, локальной и глобальных сетей и т.п.) фирмы. Общий сценарий работы агента контроля подобен типовому, описанному в [4], с учетом особенностей объекта управления и среды.

Следующий шаг в реализации СППР по управлению портфелем программных проектов – выбор мультиагентной платформы, которая предоставляет инструменты для создания и отладки отдельных агентов, управления стадиями их жизненного цикла, организации взаимодействия агентов на современном языке общения, стандартные интерфейсы обращения к хранилищу данных. Известны и пользуются популярностью такие платформы, как AgentBuilder, A-globe, AnyLogic, IBM ABLE, JaCK, JADE, JAS, Jason, Repast и проч. Основные критерии выбора платформы в нашем проекте: свободная лицензия, соответствие стандарту FIPA, открытый код платформы, наличие документации и поддержки разработчика или профессионального сообщества, возможность интеграции платформы с другими приложениями. Этим критериям в большей степени соответствуют платформы Java Agent Development Framework (JADE) [6] и Programming Multi-Agent Systems in AgentSpeak using Jason (Jason) [8]. Платформы предоставляют интегрированную среду для разработки агентов разных уровней сложности и автономности, библиотеки компонентов, возможности асинхронного запуска агентов и администрирования всего сообщества. Платформы совместимы на уровне данных и в значительной степени – пользовательского интерфейса.

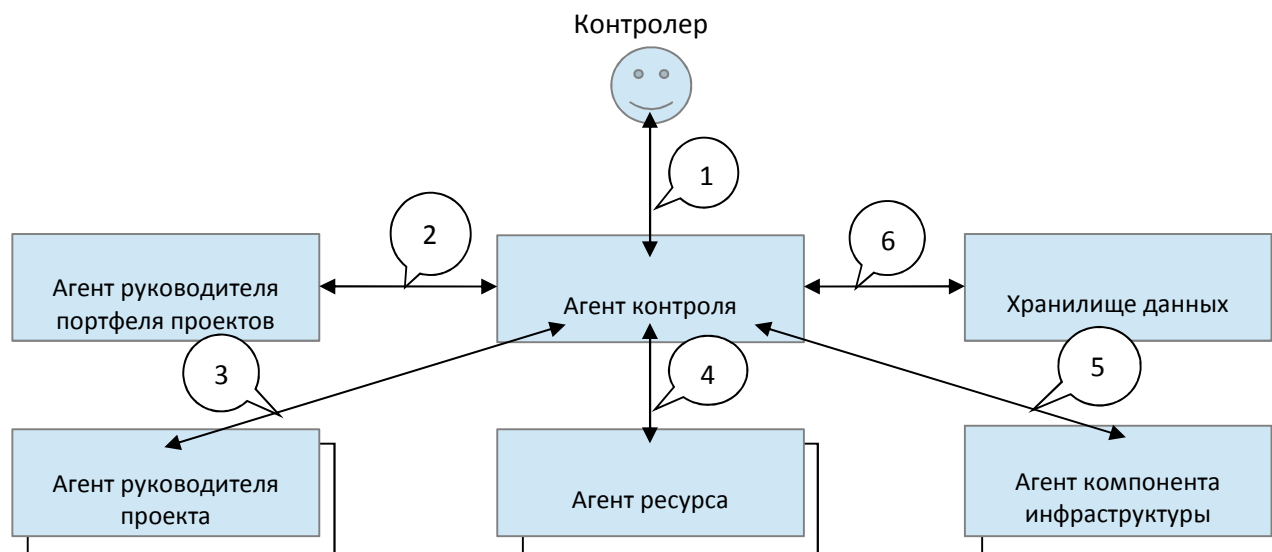


Рис. Модель среды взаимодействия агента контроля

В ходе выбора и построения архитектуры СППР по управлению портфелем программных проектов исследованы особенности управления портфелями программных проектов, обосновано применение агентных технологий, выполнены работы по классификации видов агентов, объектов и определено множество решаемых системой задач; распределены между классами агентов цели, полномочия и основные функции, а также права доступа к информации о портфеле, ресурсах организации, компонентах инфраструктуры и отдельных проектах. Представлена модель среды взаимодействия агента контроля и сценарий его работы, выбрана платформа для реализации решения.

### Литература

1. Вдовин, М. А. Агентно-ориентированный подход к совершенствованию интеллектуальной системы поддержки принимаемых решений : специальность 05.13.01, 05.13.10 «Системный анализ, управление и обработка информации» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вдовин Максим Алексеевич ; Тверской государственный технический университет. – Тверь, 2006. – 160 с. – Текст : непосредственный.

2. ГОСТ Р 54870-2011. Проектный менеджмент. Требования к управлению портфелем проектов. – Текст : электронный // Электронный фонд документов : [сайт]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200089605> (дата обращения: 05.03.2022).

3. Модели управления портфелем проектов в условиях неопределенности / В. М. Аньшин, И. В. Дем-

кин, И. М. Никонов, И. Н. Царьков. – Москва : Издательский центр МАТИ, 2007. – 117 с. – Текст : непосредственный.

4. Полянский, А. М. Применение агентно-ориентированного подхода в архитектурном моделировании организационных систем / А. М. Полянский, Е. А. Смирнова. – Текст : непосредственный // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 2 (4). – С. 48–52.

5. Программирование мультиагентных систем в AgentSpeak с помощью Jason. – Текст : электронный // Wiley : [сайт]. – URL: <https://www.wiley.com/en-ie/Programming+Multi+Agent+Systems+in+AgentSpeak+using+Jason-p-9780470029008> (дата обращения: 05.03.2022).

6. Среда разработки агента JAVA. – Текст : электронный // JADE : [сайт]. – URL: <https://jade.tilab.com/> (дата обращения: 05.03.2022).

7. Суконщиков, А. А. Мультиагентные интеллектуальные системы и сети / А. А. Суконщиков, А. Н. Швецов. – Вологда : ВоГУ, 2019. – 171 с. – Текст : непосредственный.

8. Software product management: planning tool integration / Andrey Polianskii and Darya Chukalova. – Текст : электронный // MATEC Web Conf. Volume 311, 2020. IX Czarnowski Readings – Annual International Scientific and Practical Conference on the Organization of Production and Industrial Policy. 02011. – URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202031102011> (дата обращения: 05.03.2022).

*A.M. Poliansky*  
*Vologda State University*

## MANAGING A PORTFOLIO OF SOFTWARE PROJECTS BASED ON AGENT-BASED APPROACH

The purpose of the study presented in the article is to develop the architecture of an intelligent agent-oriented software complex for managing a portfolio of projects of a software developer organization. The analysis of existing standards and methods, features of software project portfolio management and available automated management tools was carried out. In the course of the study, the conceptual architecture of the community of intelligent information agents was developed and substantiated. The characteristics of the main classes of community agents, control objects, relations between agents and actions of agents, types of tasks they solve are determined. A platform for the implementation of the software package has been selected.

Architectural model, intelligent information agent, project portfolio, system of preparation and decision-making, project management.



## **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПАДАЮЩИХ ТЕНЕЙ В 3D-ГРАФИКЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПО ТЕХНОЛОГИИ SHADOW MAPPING С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ DIRECTX 11**

Одним из важнейших эффектов для компьютерной графики являются падающие тени. Их наличие крайне важно для восприятия трехмерной сцены, так как зачастую только по теням можно судить о взаимном расположении объектов. При этом в графических API и конвейере визуализации видеокарты нет отдельных алгоритмов, напрямую реализующих тени. Но это не означает, что эффективная визуализация теней невозможна. В данном тексте рассмотрены основные принципы и техники, позволяющие в своем сочетании осуществить визуализацию падающих теней в трехмерной графике реального времени. Также описаны отдельные возможности DirectX 11, позволяющие упростить этот процесс.

3D-графика реального времени, DirectX 11, Shadow mapping, Projective texturing.

Реализация трехмерной графики реального времени сегодня практически всегда основывается на двух неразрывно связанных техниках: программировании состояния видеокарты для подготовки к визуализации при помощи вызовов графического API и непосредственно визуализации – вызова графического конвейера, аппаратно поддерживаемого видеокартой. В процессе визуализации на основе геометрического описания объектов трехмерной сцены формируется растровое изображение, которое и передается на экран. Предварительно установленные через вызовы API состояния видеокарты служат для конвейера в качестве параметров, влияющих на его работу. Отдельно стоит упомянуть шейдеры – небольшие программы, описывающие работу программируемых стадий конвейера, которые также должны быть переданы на видеокарту перед вызовом конвейера.

Из вышесказанного следует, что, с одной стороны, программирование трехмерной графики реального времени производится в достаточно жестко установленных рамках (единый конвейер, определенные программируемые стадии, конкретно установленные состояния), а с другой – в предоставляемых разработчикам программных возможностях (шейдеры, вызовы API) заложен достаточный потенциал для множества всевозможных графических эффектов.

Одним из важнейших для компьютерной графики эффектов являются падающие тени, то есть тени, которые освещенный объект отбрасывает на другие объекты. Наличие падающих теней крайне важно для восприятия трехмерного изображения, ведь, как отмечено в [1], зачастую именно по ним можно судить о положении объекта в пространстве. Например, если тень от стоящего на земле самолета будет всегда находиться прямо под ним, то тень от взлетевшего самолета может находиться на различном расстоянии от него в зависимости от положения Солнца. Таким образом, при взгляде на этот самолет сверху только по одной лишь тени можно будет судить о его положении.

В графических API или конвейере визуализации видеокарты не предусмотрено отдельных специальных алгоритмов, непосредственно реализующих тени, но предоставляемых ими программных возможностей общего назначения вполне достаточно для воплощения теней без существенных потерь в производительности.

Целью данного материала является подробный разбор общего существующего подхода к реализации динамических падающих теней, а также его адаптация и применение для визуализации средствами конкретного графического API DirectX 11 в составе DirectX 11.

В ходе достижения поставленной цели будут решаться задачи, связанные с изучением и описанием общей технологии визуализации падающих теней и связанных процедур, с поиском составляющих API DirectX, при помощи которых будет производиться реализация теней и с применением полученных знаний для визуализации теней на конкретном примере.

### **Проективное текстурирование**

В основе описываемого в данной работе подхода к реализации теней лежит техника проективного текстурирования. Согласно [2], задача его состоит в том, чтобы текстура (растровое изображение, хранимое в памяти как прямоугольная матрица) накладывалась на трехмерную сцену со стороны подобно изображению с кинопроектора в кинотеатре.

При обычной визуализации сначала (на стадии вершинного шейдера) каждая вершина, из которых состоит любой трехмерный объект, проецируется из трехмерного пространства на плоскость, соответствующую нашему экрану. Затем (при растеризации) все эти спроецированные вершины преобразуются в пиксели, которые и формируют изображение на экране. Таким образом, проецируя вершины на плоскость экрана, мы определяем, какой из пикселей экрана будет соответствовать той или иной вершине. А те пиксели, которым не попало в соответствие ни одной вершины, получают свои данные путем интерполяции.

Проективное же текстурирование основано на том, что помимо плоскости экрана добавляется еще одна плоскость, на которую будут проецироваться вершины – плоскость накладываемой текстуры. При проецировании вершин (на стадии вершинного шейдера) на эту дополнительную плоскость будет получено соотношение типа «вершина – координаты пикселя на текстуре». После растеризации координаты вершин будут преобразованы в параметры пикселей на экране. Таким образом, взяв координаты одного такого пикселя экрана, можно по имеющемуся соотношению получить соответствующие координаты пикселя на проецируемой текстуре и прибавить цвет пикселя текстуры к цвету пикселя экрана. По результатам выполнения данного действия для всех пикселей экрана и будет достигнут эффект спроецированной текстуры.

Наглядно логика проективного текстурирования представлена на рисунке ниже. При обработке каждого пикселя результирующего изображения через интерполированные координаты объекта сцены происходит обращение к связанным с ними координатам проецируемой текстуры.

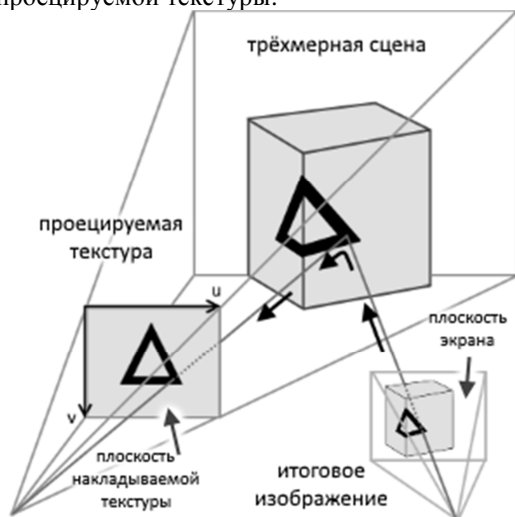


Рис. 1. Логика визуализации с использованием проективного текстурирования *Shadow mapping* (наложение теней)

Общая логика реализации теней согласно [3] может быть разделена на два шага по количеству вызовов конвейера визуализации и состоит в следующем.

На первом шаге выполняется фиктивная визуализация всей трехмерной сцены из позиции источника света, порождающего тень. Фиктивна она потому, что в результате не будет формироваться изображение сцены. Но при этом в процессе такой визуализации производится заполнение буфера глубины – отдельной текстуры, в которую записывается расстояние ближайших к зрителю (в данном случае – к источнику) фрагментов сцены. Данные из буфера глубины будут использоваться для построения теней. Буфер глубины, используемый для реализации теней, именуется картой теней (*shadow map*).

На втором шаге производится обычная визуализация с позиции зрителя, наблюдающего сцену. Но после растеризации, на стадии пиксельного шейдера, когда вычисляются значения цветов каждого пикселя визуализируемого объекта, применяется проективное

текстурирование, где в роли проецируемой текстуры выступает карта теней.

Как было отмечено ранее, каждый пиксель визуализируемого объекта содержит свои координаты в пространстве, интерполированные по вершинам геометрии данного объекта. Имея их и координаты источника света, формирующего тень, можно вычислить расстояние от источника до каждого конкретного пикселя, что и выполняется.

При проецировании карты теней на сцену каждый пиксель получает в соответствие значение из буфера глубины, содержащее расстояние от источника до ближайшего к нему фрагмента поверхности.

Получив таким образом расстояние от источника до ближайшего фрагмента сцены в каждом пикселе и расстояние от него же до каждого конкретного фрагмента сцены, можно, сравнив их, определить: находится ли данный конкретный фрагмент в тени или же освещен падающим светом. Если данные значения совпадают, то данный фрагмент – ближайший к источнику и не может быть затенен. В противном случае свет от источника до данного фрагмента перекрыт более близким объектом, следовательно – фрагмент находится в тени.

#### Получение карты теней, ортографическая проекция

Для отображения любых объектов трехмерной сцены их необходимо спроецировать из пространства на плоскость экрана. В этом случае обычно используется перспективное проецирование, так как перспектива (уменьшение размеров объектов с увеличением расстояния до них) присуща реальному миру в том виде, как наблюдает его человек.

Но для получения карты теней такое проецирование не подходит. Как можно увидеть на примере рисунка 1: размер проецируемой на объект текстуры зависит от того, насколько далеко этот объект расположен от центра проекции. Если использовать перспективную проекцию и для получения карты теней, то эффект будет тот же: тени будут увеличиваться при отдалении объекта от источника света. Но при освещении солнечным светом (т.е. когда источник находится очень далеко) размер теней всегда одинаков. Поэтому для имитации солнечного света можно либо разместить источник очень далеко и оперируя большими числами, получать расстояние до объекта с заметными ошибками, либо согласно [4] использовать ортографическое проецирование, где перспектива не учитывается. Пример ортографического проецирования координат объекта на плоскость показан на рисунке 2.

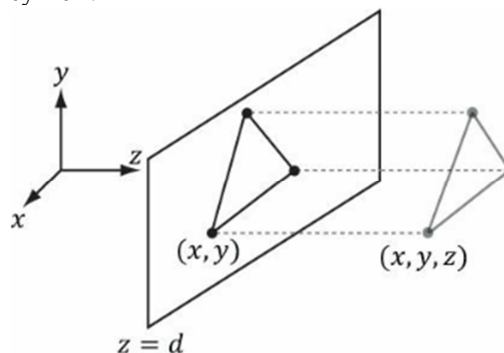


Рис. 2. Проецирование на плоскость при ортографической системе координат

Для выполнения ортогографического проецирования необходимо сначала преобразовать координаты объектов сцены в ортогографическую систему координат из перспективной.

В трехмерной графике для работы с расположением геометрии объектов в пространстве используется декартова система координат с тремя осями:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Для каждой вершины ее расположение по всем трем осям хранится в виде вектора. Для преобразования из одного координатного пространства в другое используют матрицы. Результатом векторно-матричного произведения является новый вектор, указывающий расположение той же вершины, но уже в другом пространстве координат.

Процесс получения матрицы, преобразующей координаты вершин в ортогографическое пространство координат, изложен в [4]. Сама матрица, участвующая в векторно-матричном произведении, представлена на рисунке 3. Единица в конце является признаком того, что вектор обозначает позицию вершины, а  $u$  позиции может быть не только направление, но и расстояние относительно центра пространства координат.

положение старой оси "x" в новых осях координат      ...оси "y"      ...оси "z"

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \frac{2}{w} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{f-n} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{n}{n-f} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix}$$

↑  
смещение координат в новом пространстве относительно старых осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$

Рис. 3. Векторно-матричное произведение с матрицей преобразования в ортогографическое пространство координат

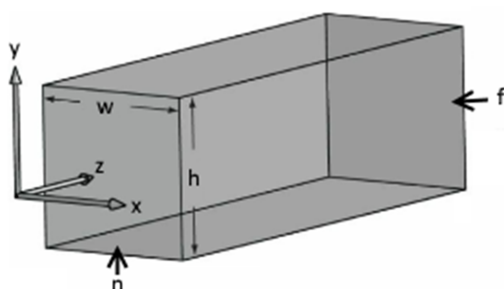


Рис. 4. Ортогографическое пространство координат, в которое попадают вершины после преобразования

### Собственные тени, связь с системой освещения

В трехмерной графике для визуализации освещенности объектов применяется алгоритм его расчета, где результирующее освещение формируется из трех составляющих: ambient (непрямое освещение), diffuse (освещение шершавого объекта) и specular (блики от света на гладком объекте). Как видно из

рисунка 5, модель освещения сама формирует собственное затенение объекта.

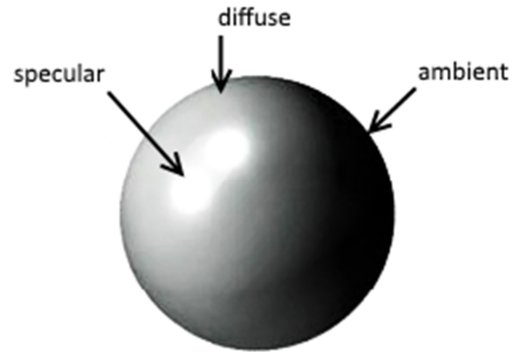


Рис. 5. Составляющие модели освещения в трехмерной графике

Более того, данный алгоритм в пиксельном шейдере и использует для расчетов интерполированные по пикселям значения нормалей каждой вершины, что делает освещение плавным.

Алгоритм же визуализации теней основан на проективном текстурировании с использованием текстур относительно невысокого разрешения, а значит – дает менее плавный результат.

При простом применении техники shadow mapping в цвета тени окрашиваются все фрагменты, не находящиеся под прямым освещением. Это ведет к тому, что собственные тени модели освещения перекрываются тенями техники shadow mapping, выдавая менее качественное и плавное изображение.

Решение данной проблемы достаточно простое – нужно запретить значению, полученному при расчете падающей тени, влиять на ambient-составляющую освещения. Вместо этого значение тени будет модифицировать только diffuse и specular-составляющие, не нарушая тем самым собственные тени объектов.

### Особенности воплощения shadow mapping с использованием API DirectX 11

Для того чтобы иметь возможность создавать и использовать карту теней (shadow map), прежде всего нужно создать пустую текстуру нужного разрешения с bind-флагами: D3D11\_BIND\_DEPTH\_STENCIL и D3D11\_BIND\_SHADER\_RESOURCE, что позволит использовать ее сперва в качестве буфера глубины (при генерировании карты теней), а затем – для проективного текстурирования.

В DirectX3D для передачи в память видеокарты используются не сами текстуры, а специальные объекты (интерфейсы) – представления (view). Соответственно, для созданной текстуры нужно сформировать Depth Stencil View и Shader Resource View. Детально процесс получения view'ов изложен в [4].

При сравнении расстояния от незатененного фрагмента до источника с соответствующим значением в карте теней может возникнуть непредвиденное расхождение значений (хотя они должны быть равны) из-за того, что карта теней представляет собой растровое изображение. Это приводит к накладыванию теней на те фрагменты, где их быть не должно. Поэтому для вызова конвейера, генерирующего карту теней, желательно задать состояние растеризации

(rasterizer state) с набором параметров, сглаживающих последующие ошибки проективного текстурирования.

```
typedef struct D3D11_RASTERIZER_DESC {  
    [...]   
    INT DepthBias;FLOAT  
    DepthBiasClamp;FLOAT  
    SlopeScaledDepthBias;  
    [...]   
} D3D11_RASTERIZER_DESC;
```

При проецировании карты теней на объекты сцены, когда производится наложение теней, в DirectX 11 имеются встроенные возможности, позволяющие получить более сглаженные тени.

Если для простого чтения значения из текстуры используется SamplerState, позволяющий получить только одно значение, то для обращения к карте теней имеется специальный SamplerState – SamplerComparisonState. При его использовании из карты теней сначала автоматически считывается 4 значения, а потом производится билинейная интерполяция для вычисления одного усредненного на их основе. Такая техника, носящая название PCF (Percentage Close Filtering) позволяет формировать тени с мягкими краями без серьезных потерь в производительности.

В результате суммирования всего вышесказанного накапливается достаточно информации, чтобы выполнить визуализацию сцены с реализацией теней.

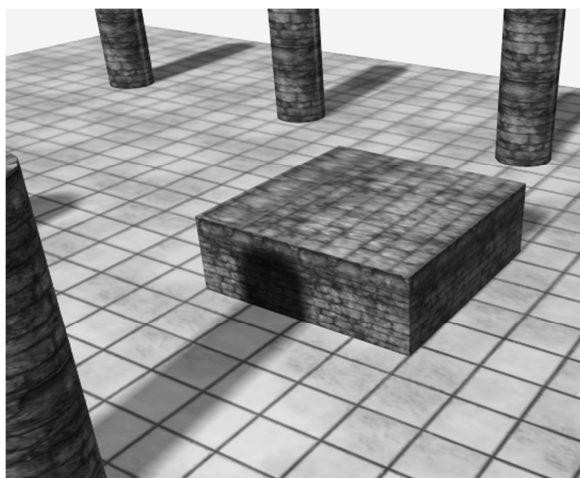


Рис. 6. Визуализация трехмерной сцены с падающими тенями

*A.A. Sukonshchikov, V.V. Kruglov  
Vologda State University*

## **RENDERING SHADOWS IN REALTIME 3D-Graphics WITH DIRECTX 11 USING THE SHADOW MAPPING TECHNIQUE**

Falling shadows are one of the main effects in 3D computer graphics. Its presence is important for perception of 3D scenes because shadows often become the only factor which allows to understand the objects' location. Despite this there aren't any special efficient built-in algorithm neither in graphics API nor in rendering pipeline. However, that doesn't mean that it is impossible to render shadows in realtime 3D graphics efficiently. In this text we cover the main principles and techniques which, if combined, make it possible to efficiently visualize falling shadows in realtime 3D graphics. Here we also describe DirectX 11 features which make this process easier.

Realtime 3D graphics, DirectX 11, Shadow mapping, Projective texturing.

Результат визуализации сцены с наличием динамических (т.е. на каждом кадре) генерируемых падающих теней по технологии shadow mapping с использованием графического API DirectX 11 продемонстрирован на рисунке 6.

При визуализации данной сцены была использована карта теней с разрешением 1024×1024 пикселей. Генерация карты теней выполнена предварительной установкой соответствующего RasterizerState. Взятие значения из проецируемой карты теней для каждого фрагмента производилось с использованием SamplerComparisonState, что обеспечило достаточный уровень сглаживания даже для относительно небольшого размера текстуры карты теней.

Таким образом, в результате исследования данной темы были рассмотрены, исследованы и на основании этого подробно изложены основные принципы и техники, лежащие в основе процесса визуализации падающих теней в трехмерной графике реального времени, был изучен набор вспомогательных программных возможностей DirectX 11, которые могут быть использованы для упрощения реализации теней и избавления от ошибок их отображения. В качестве подтверждения корректности полученных знаний была произведена визуализация тестовой сцены.

### **Литература**

1. Shadow Mapping: GPU-based Tips and Techniques / AMD Developer Central. – URL : <https://developer.amd.com/wordpress/media/2012/10/Isidoro-ShadowMapping.pdf> (дата обращения: 03.03.2022). – Text : Electronic.
2. Projective Texturing. – URL : <http://www.rastertek.com/dx11tut43.html> (дата обращения: 03.03.2022). – Text : Electronic.
3. Tutorial 16 : Shadow mapping. – URL : [http://www.opengl-tutorial.org/intermediate\\_tutorials/tutorial-16-shadow-mapping](http://www.opengl-tutorial.org/intermediate_tutorials/tutorial-16-shadow-mapping) (дата обращения: 03.03.2022). – Text : Electronic.
4. Luna, F. Introduction to 3D game programming with DirectX® 11 / Luna F. – Copy-right © Mercury learning and information llc, 2012. – 754 p.



*А.С. Баев*  
*Санкт-Петербургский государственный*  
*морской технический университет*

## ОСОБЕННОСТИ ПРИВОДА АЗИМУТАЛЬНЫХ ПРОПУЛЬСИВНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены задачи и современные требования к портовым буксирам. Обоснован тип привода движителей азимутальных буксиров. Рассмотрена конструкция полноповоротных винторулевых колонок с открытыми винтами фиксированного шага.

Азимутальные буксиры, винторулевые колонки, привод винтов фиксированного шага.

Ровно 30 лет назад автор, в то время старший научный сотрудник Института проблем транспорта Российской академии наук (ИПТРАН), был назначен руководителем группы по оценке «существующего состояния внутренних водных путей и возможности их использования для обеспечения работы порта на Балтике» (в то время так именовался будущий порт Усть-Луга), а в 2004 году, работая заместителем генерального директора по судостроению и судоремонту судоходного холдинга ОАО «Северо-Западное пароходство», был привлечен к разработке концепции создания и эксплуатации вспомогательного технического флота Морского торгового порта «Усть-Луга» (МТП «Усть-Луга»).

В первом случае были разработаны необходимые мероприятия по обеспечению перевозок для нового морского порта речным транспортом [1], а во втором – обоснована концепция строительства и эксплуатации пилотной серии судов технического флота МТП «Усть-Луга» [2].

В соответствии с нормативами проектирования портов для обеспечения работы первой очереди МТП «Усть-Луга» требовался флот из 32 судов, ядром которого являлись портовые буксиры-кантовщики (далее – портовые буксиры).

Портовые буксиры решают самые разнообразные задачи, а именно:

- проводка судов, выполнение швартовых операций и морские буксировки;
- ледокольный сервис (проводка, оковка льда в порту);
- ликвидация аварийного разлива нефтепродуктов (ЛАРН);
- доставка на суда и снятие оборудования;
- гидрографические и водолазные работы;
- несение вахты по пожаробезопасности и ЛАРН;
- аварийно-спасательные работы.

Для выполнения этих задач предварительно были определены рациональные типы буксиров для МТП

«Усть-Луга», в частности расчетным путем было обосновано, что в составе портофлота целесообразно иметь буксиры с суммарной мощностью главных двигателей от 2 до 5 МВт. Кроме того, при корректировке состава портофлота были учтены инновационные требования к буксирам, а именно:

- высокая маневренность;
- динамическое позиционирование;
- быстрый переход от режима толкания к режиму тяги и наоборот;
- возможность обеспечения эффективной тяги в любом направлении;
- надежность работы пропульсивного комплекса;
- многофункциональность (работа в режимах портовом, эскортном и т.д.)
- отсутствие риска касания винтами корпуса обслуживаемого судна;
- простота обслуживания и управления;
- возможность «бесконтактных» операций с обслуживаемым судном посредством воздействия струи винта и т.д.

Этим требованиям наиболее полно удовлетворяли появившиеся в начале XXI века в отечественном портовом сервисе буксиры с азимутальным принципом движения (далее – азимутальные буксиры).

Анализ рынка портового сервиса Восточной Балтики и возможностей судостроительных предприятий региона позволил сделать выбор в пользу строительства азимутальных буксиров на заводе ОАО «Судостроительный завод „Пелла“» (далее – завод «Пелла»), который к тому времени классифицировал в Российском морском регистре судоходства (РМРС) два проекта азимутальных буксиров (табл.).

Конструктивно азимутальный принцип движения судов реализуется за счет использования в составе их судовых пропульсивных комплексов (СПК) полноповоротных винторулевых колонок (ВРК), которые обеспечивают полный упор гребных винтов при повороте колонок от 0 до 360 градусов.

Проектные показатели азимутальных буксиров завода «Пелла» [3]

Наименование параметра	№ проекта	
	90600	16609
Класс РМРС	КМ*Arc4 R3 AUT3 Tug	КМ*Arc4 R2 AUT3 Escort Tug
Водоизмещение, т	300	500
Длина наибольшая, м	25,4	29,5
Ширина наибольшая, м	8,8	9,5
Высота борта, м	4,7	4,8
Осадка кормой (Т), м	3,8	4,3
Тяговое усилие (F), т	35	55
Скорость, уз	11,5	12
Мощность главных двигателей, МВт	2×1,1	2×1,6
Мощность дизель-генераторов, КВА	2×80	2×145
Возможный диапазон номинальных частот коленчатых валов главных двигателей $n_n$ , об/мин	1200–1800	1200–1800
Необходимый диапазон передаточных чисел ВРК (i)	3,40–5,10	3,48–5,22

ВРК представляют собой объединение движительного и рулевого устройств в одном агрегате. В таком составе винторулевые колонки исполняют роль активных средств управления судном, вплоть до его разворота на месте.

По типу привода гребного винта ВРК разделяются на колонки с электрическим и механическим приводом.

Особенностью электроприводных ВРК является размещение электродвигателя, который обеспечивает непосредственный привод чаще одного, а иногда и двух гребных винтов, в гондоле колонки.

По составу движителей ВРК разделяются на колонки с открытыми одиночными винтами фиксированного шага (ВФШ), с соосными ВФШ противоположного вращения и с гребными ВФШ в направляющих насадках. ВРК с ВФШ в насадках поставляются также и с гребными винтами регулируемого шага.

При подборе ВРК, наряду с их конструктивными особенностями, определяющими являются передаваемая мощность и передаточное число, необходимое значение которого, зная тяговое усилие (F) и осадку (Т), в первом приближении можно определить с помощью известного соотношения [4]:

$$i = n_n(T)^2 / (860 * F^{0,5}),$$

где  $i$  – необходимое передаточное число ВРК (отношение частот вращения входного вала ВРК и движителя);

$n_n$  – номинальная частота вращения коленчатого вала главного двигателя, об/мин.

В таблице приведены результаты обоснования возможного диапазона передаточных чисел ВРК для буксиров завода «Пелла» с учетом того, что, поскольку размеры машинных отделений, равно как и самих буксиров, ограничены, то обычно в качестве их главных двигателей используются судовые дизели повышенной оборотности с удельной массой менее 5 кг/кВт. Так, на буксирах корпорации «Damen» – мирового лидера по азимутальным буксирам – широко применяются судовые дизели фирмы «Caterpillar» с номинальной частотой вращения коленчатых валов от 1200 до 1800 об/мин.

Анализ рынка винторулевых колонок показал, что необходимому диапазону передаточных чисел (табл.) и требуемому мощностным показателям буксиров для МТП «Усть-Луга» в наибольшей степени удовлетворяют механические ВРК «Aquamaster», которые по-

ставляются с передаточными числами от 3,30 до 6,10 при возможной передаваемой мощности до 3 МВт.

В связи с этим, учитывая, что диапазоны передаточных чисел проектов отличаются незначительно (табл.), на буксирах завода «Пелла» были применены унифицированные (одного и того же типоразмера) ВРК с механическим приводом открытых одиночных гребных винтов фиксированного шага посредством Z-образной зубчатой передачи (рис. 1).

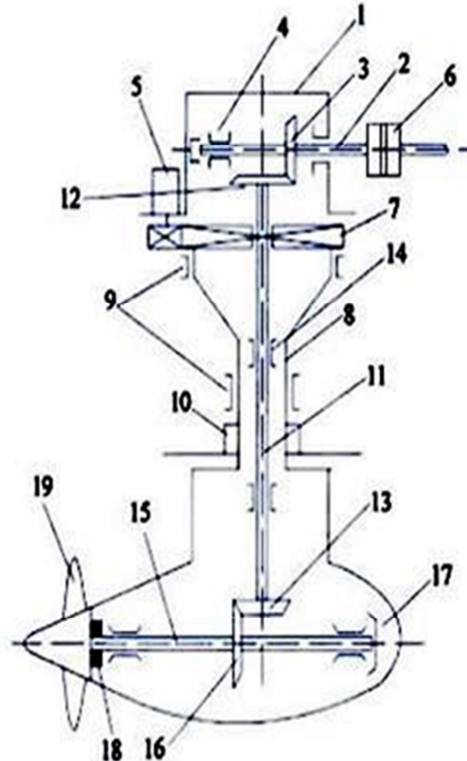
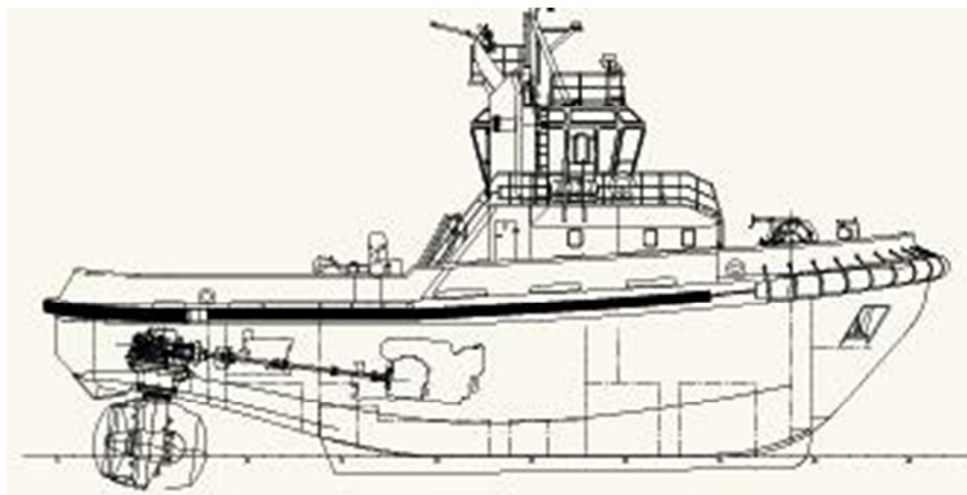
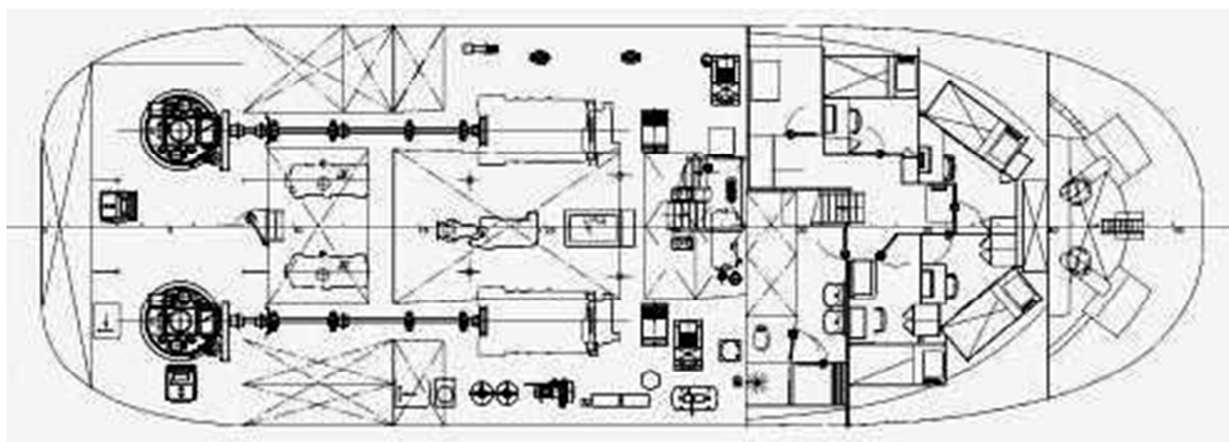


Рис. 1. Винторулевая колонка с механической передачей мощности: 1 – корпус; 2 – ведущий вал; 3 – ведущая шестерня; 4 – радиально-упорные подшипники вала; 5 – привод поворота; 6 – муфта; 7 – зубчатое колесо румпельного механизма; 8 – стойка колонки; 9 – подшипники поворота стойки; 10 – уплотнение; 11 – промежуточный вертикальный вал; 12 – верхняя угловая ведомая шестерня; 13 – нижняя ведущая угловая шестерня; 14 – подшипники вертикального вала; 15 – гребной вал; 16 – нижняя ведомая угловая шестерня; 17 – радиально-упорные подшипники гребного вала; 18 – уплотнение гребного вала; 19 – открытый гребной винт фиксированного шага



а)



б)

Рис. 2. Азимутальный буксир завода «Пелла»: а) вид с правого борта; б) план машинного отделения и бытовых помещений

ВРК «Aquamaster» с открытыми ВФШ конструктивно проще по сравнению с колонками других фирм и, что важно для МТП «Усть-Луга», лучше работают в ледовых условиях.

В составе СПК с Z-образной передачей мощность главного двигателя через валопровод передается на ведущий вал колонки (2) и далее последовательно с помощью конических редукторов на промежуточный вертикальный вал (11) и гребной вал (15). Соединение валопровода и ведущего вала ВРК осуществляется с помощью муфты (6), а поворот ВРК вокруг своей оси – электродвигателем (5).

В целом главный энергетический комплекс азимутальных буксиров завода «Пелла» включает два автономных СПК – каждый в составе главного дизельного нереверсивного двигателя повышенной оборотности, валопровода и ВРК, которые (СПК) располагаются симметрично относительно диаметральной плоскости буксира (рис. 2).

Такое конструктивное решение обеспечивает еще более высокую маневренность буксиров, повышает их живучесть, энергетическую эффективность гребных винтов (всегда работают при глубоком погружении) и работоспособность СПК (применяются нереверсивные главные дизели), а также снижает трудоемкость

монтажа и обслуживания движительных комплексов буксиров, чему также способствуют агрегатность и унификация их конструкции.

Следует отметить, что в настоящее время на основе зарубежного и отечественного опыта установлено, что азимутальные судовые пропульсивные системы (так часто называют в общем случае судовые системы привода движителей с ВРК) надежно работают в сочетании с главными двигателями повышенной оборотности мощностью до 4 МВт.

В указанный предел укладываются мощности практически всех судов смешанного и внутреннего плавания. В связи с этим полноповоротные ВРК с механическим приводом гребных винтов стали использоваться и на отечественных грузовых и круизных судах внутреннего водного транспорта [5]. Способствует этому также и то, что отечественная промышленность наладила производство механических полноповоротных винторулевых колонок в диапазоне мощностей от 1 до 3,5 МВт.

#### Выводы

1. Характерной особенностью движительных комплексов буксирных судов Морского торгового порта «Усть-Луга» является использование унифицированных полноповоротных винторулевых колонок с

механическим Z-образным зубчатым приводом открытых гребных винтов фиксированного шага.

2. Азимутальный принцип движения является актуальным и для отечественных грузовых и пассажирских судов внутреннего водного транспорта.

### Литература

1. Определение перспектив развития производственных мощностей областного, регионального и государственного масштабов, связанных с транспортной инфраструктурой порта на Балтике // Отчет по теме П/2-6. – Санкт-Петербург : ИПТРАН, 1992. – 40 с.

2. Баев, А. С. Строительство и эксплуатация пилотной серии судов портофлота: инвестиционный

меморандум / А. С. Баев, А. В. Донской. – Санкт-Петербург : ОАО «Компания Усть-Луга», 2004. – 19 с.

3. Пелла : официальный сайт Ленинградского судостроительного завода. – URL: <http://www.pellaship.ru/shipbuilding/> (дата обращения: 29.08.2022). – Текст : электронный.

4. Артюшков, Л. С. Судовые движители : учебник для вузов / Л. С. Артюшков, А. Ш. Ачкинадзе, А. А. Русецкий. – Ленинград : Судостроение, 1988. – 296 с.

5. Егоров, Г. В. Многоцелевые сухогрузные суда смешанного «река – море» плавания класса «Волго-Дон» типа «Надежда» и «Танаис» / Г. В. Егоров, И. А. Ильницкий, В. И. Тонюк // Судостроение. – 2011. – № 5. – С. 9–18.

*A.S. Bayov*

*St. Petersburg State Marine Technical University*

### AZIMUTH PROPULSION SYSTEMS DRIVE FEATURES

The tasks and modern requirements for tugs are considered. The type of drive of azimuthal tugs is justified. The design of full revolving propeller-rudder columns with open fixed pitch screws is considered.

The azimuthal tugs, the propeller-rudder columns, the drive fixed pitch screws.



## САД-АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НА МАЛЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Инновационная трансформация малых машиностроительных предприятий предусматривает их интеграцию в единое поле виртуальных фабрик на основе стратегии Национальной технологической инициативы. В работе показано формирование компетенций на базе производственных технологий САД. Выпуск кастомизированных изделий с новыми качествами и создание наукоемких направлений в промышленности приводят к производству глобально конкурентоспособной продукции. Новые тренды требуют интеллектуализации производственных процессов и соединения материального и цифрового производств. Интеллектуальная модель предполагает быстрое принятие эффективных решений и способность к ускорению процессов адаптации. Все изменения сопровождаются развитием принципиально новых бизнес-процессов на всех уровнях.

3D-прототип, цифровое сопровождение, конструкторское сопровождение производства, информационная среда, малые предприятия.

Цифровое проектирование включает конструкторский и технологический разделы, а также инженерное сопровождение по силовым, тепловым, оптимизационным расчетам элементов и узлов изделий [1–5]. В ходе конструкторского сопровождения производства уточняются кинематика и компоновка, состав продукта, а также общая конфигурация конструкции при соблюдении требований унификации и предельного наполнения его стандартными комплектующими. Здесь назначаются физико-химические свойства материалов деталей и прогнозируются энергетические показатели проектируемого механизма.

Процесс автоматизированного проектирования базируется на классификации и кодировании новых элементов и сопровождается поиском их аналогов в

банках данных типовых компонентов либо в выполненных ранее проектах с использованием методов синтеза и адресации. Технологии 3D предполагают оформление электронных моделей изделий (ЭМИ) согласно ГОСТ 2.052-2015, а также цифровых прототипов сборочных единиц и конструкции в целом [1–6]. Выбор методологии проектирования – снизу вверх, сверху вниз, комбинированная и др. – определяется целесообразностью и является прерогативой конструктора. Формирование в 2D-формате рабочих чертежей деталей и спецификаций сборок осуществляется на САД-платформе автоматически. На рисунке 1 представлена ЭМИ «Ось» из состава электронного прибора, выполненного на платформе «Компас-3D».

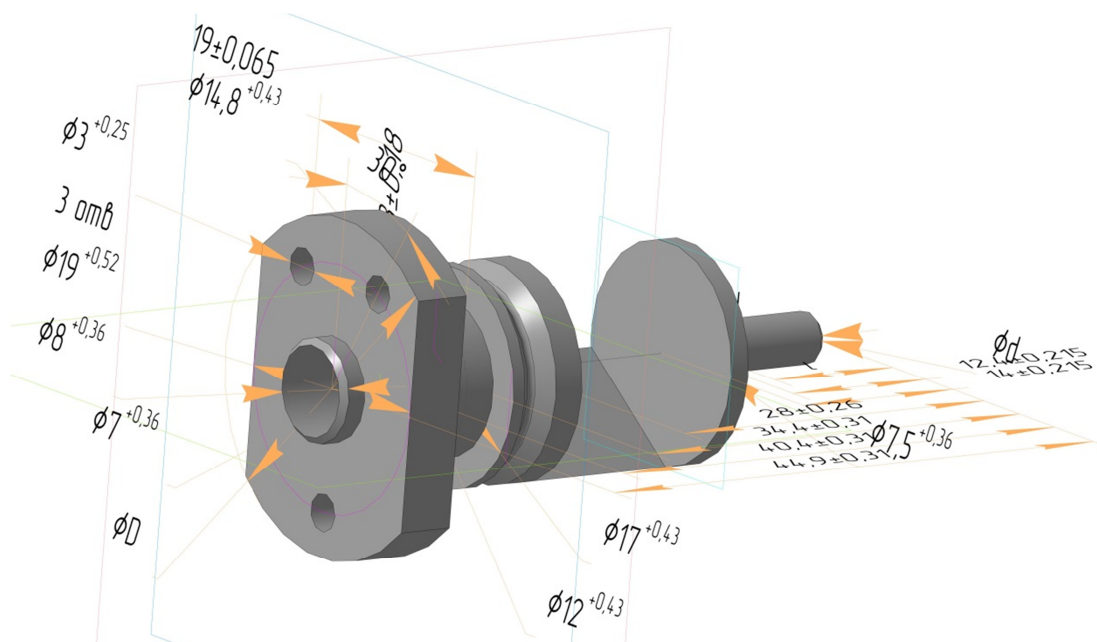


Рис. 1. Электронная модель изделия «Ось»

Опции параметризации определяют возможности быстрого перестроения объекта и управления изменениями, что обеспечивает разнообразие в формообразовании для моделей сходных изделий на основе единой созданной цифровой прототипа. Параметрическое изображение, кроме сведений о характеристиках объекта, содержит информацию о связях и ограничениях, что позволяет задать правила поведения геометрии при ее изменении [3–5, 7].

Работа для детали с исполнениями опирается на технологию параметризации, реализуя принцип «одна модель – много вариантов», поскольку нацелена на применение большого числа переменных (пользовательских, параметров операций, предельных отклонений). У созданных исполнений одинаковая геометрия, но разные размеры, которые устанавливаются с помощью аргументов, причем режим сопровождается оформлением требуемой документации на деталь.

Значительно сокращает трудозатраты и сроки выполнения проектов работа с приложениями в случае, когда проектирование изделий осуществляется с помощью средств объектного моделирования, при разработке конструкции из сходных модулей и средствами зеркального отражения.

Электронные сборки позволяют выявить возможные коллизии и ошибки при соединениях. Средства анимации позволяют через проверку соударений исследовать кинематику механизма с учетом сопряжений в подсборках. На рисунке 2 представлен электронный образ механизма выверки визира из комплекта электронного прибора. Визуализация сборочной единицы или изделия выполняется через цветовые гаммы, с использованием оптических свойств и различных текстур, чем достигается эффект фотореалистичности [3–5, 7].

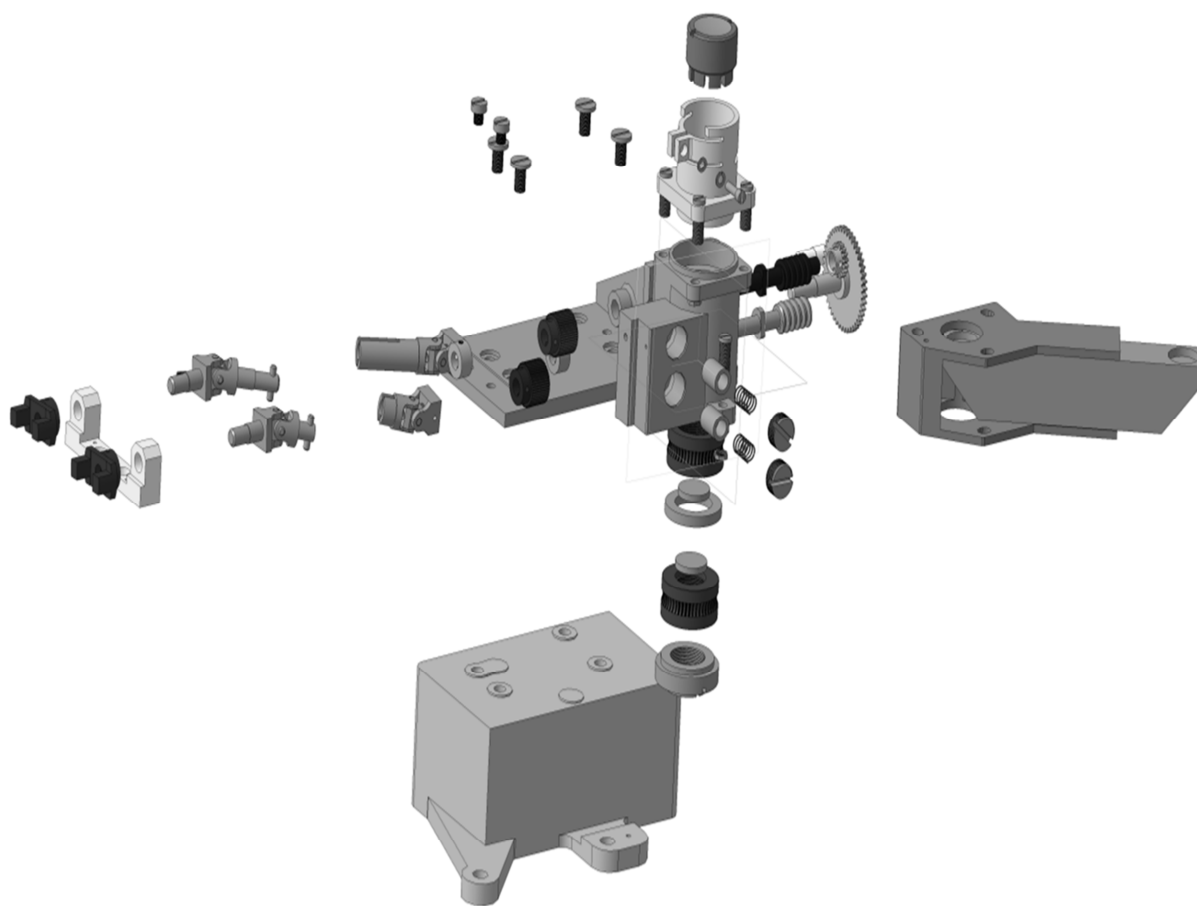


Рис. 2. Разнесенная сборка механизма выверки визира

В функции САД-платформы входит режим разнесения сборочных единиц на детали, а отдельные узлы, входящие в сборку, могут быть вынесены как одним элементом, так и представлены подетально, что иллюстрировано на рисунке 2. Наглядность достигается путем создания сечений и разрезов. Требования к результату – демонстрация последовательности операций при сборке/разборке модулей и возможность быстрого редактирования объекта. Для представления

о конструкции в целом оформляется электронный каталог готового изделия.

При завершении конструкторского этапа проводится контроль документации через экспертное приложение, в функции которого входит поиск коллизий и неточностей в оформлении ЭМИ и 2D-чертежей. Продукт российской фирмы «Аскон» – «Компас-Эксперт» – обеспечивает в настоящий момент около 200 проверок на ошибки в исполнении.

Существующий технологический этап требует интеграции малых машиностроительных предприятий в цифровое поле виртуальных фабрик на основе стратегии перехода к цифровому производству в рамках нацпроектов и инициативы «Технет» [1, 2]. Содержанием цифрового конструкторско-технологического обеспечения подготовки производства являются: проектирование и моделирование в 3D-формате, автоматизированная технологическая поддержка и инжиниринговый анализ отдельных изделий и всей конструкции [3–5, 7].

Новые технологические вызовы определяют направление в развитии производства, отвечают росту конкурентоспособности и качества продукции, приводят к ускоренному выпуску новых видов изделий. Проникновение цифровых технологий в деятельность малых машиностроительных предприятий находит отражение во внедрении и активном использовании CAD/CAM/CAE/CAO-, MES-платформ. Рост компетенций разработчиков позволяет проектировать оборудование и приборы, отличающиеся пониженными значениями энергоемкости и материалоемкости, высокими эргономическими показателями. Использование высокотехнологичных программных платформ характеризует тенденцию появления производств с цифровым сопровождением, что приводит к росту производительности труда и повышению потребительских свойств товаров и услуг.

#### Литература

1. О дорожной карте «Технет» (передовые производственные технологии) национальной технологической инициативы / А. Боровков, Ю. Рябов // Двигатели для гражданской авиации. – 2017. – № 10, С. 8–11. –

URL: [http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/04\\_april/13/Korporativnyy\\_jurnal\\_Tramplin\\_k\\_uspehu\\_10\\_2017\\_O\\_Technet\\_Nti.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/04_april/13/Korporativnyy_jurnal_Tramplin_k_uspehu_10_2017_O_Technet_Nti.pdf) (дата обращения: 29.08.2022). – Текст : электронный.

2. Цифровое производство. Методы, экосистемы, технологии // Рабочий доклад Департамента корпоративного обучения Московской школы управления «Сколково», ноябрь 2017. – URL: [http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11\\_november/17/tsifrovoe\\_proizvodstvo\\_112017.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2017/11_november/17/tsifrovoe_proizvodstvo_112017.pdf) (дата обращения: 6.11. 2019). – Текст : электронный.

3. Булавин, В. Ф. Цифровая трансформация технологического сопровождения производства в малых предприятиях / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, Д. В. Кошутин [и др.]. – doi: 10.18698/0536-1044-2021-9-15-29 // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 9. – С. 15–29.

4. Булавин, В. Ф. Политика цифровых технологий на малых машиностроительных предприятиях / В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев, А. С. Степанов. – doi: 10.18698/0536-1044-2019-9-35-45 // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2019. – № 9. – С. 35–45.

5. Цифровой формат подготовки приборостроительного производства. Часть 1. Конструкторский этап / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, В. В. Яхричев, А. С. Степанов. – doi: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-157-166 // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – № 3. – С. 1–8.

6. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в Solid Works Simulation / А. А. Алямовский. – Москва : ДМК-Пресс, 2010. – 464 с.

7. Digital Support of Production Small Business Preparation in Engineering / V. F. Bulavin, T. G. Bulavina, C. A. Stepanov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399. – P. 033045.

*V.F. Bulavin, T.G. Bulavina*  
*Vologda State University*

#### CAD DESIGN AUTOMATION IN SMALL ENTERPRISES

The innovative transformation of small machine-building enterprises provides for their integration into a single field of virtual factories based on the strategy of the National Technological Initiative. The paper shows the formation of competencies based on CAD production technologies. The production of customized products with new qualities and the creation of knowledge-intensive areas in industry lead to the production of globally competitive products. New trends require the intellectualization of production processes and the connection of material and digital production. The intelligent model assumes rapid adoption of effective decisions and the ability to accelerate adaptation processes. All changes are accompanied by the development of fundamentally new business processes at all levels.

3D-prototype, digital support, design support of production, information environment, small enterprises.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОБЪЕКТОВ С ГУММИРОВАННЫМ ПОКРЫТИЕМ

Проведены исследования теплообмена при жидкостном охлаждении плоского горизонтально расположенного гуммированного объекта. Установлены основные характерные особенности изучаемого процесса, проведена оценка влияния отдельных определяющих параметров на интенсивность теплоотдачи для дальнейших экспериментальных исследований, предназначенных для разработки практических обобщенных рекомендаций.

Плоский горизонтально расположенный гуммированный объект, плотность ( $\rho$ ), теплоемкость ( $c_p$ ), коэффициент теплопроводности ( $\lambda$ ), коэффициент теплоотдачи ( $\alpha$ ), капиллярно-пористый материал, поверхность охлаждения, расход воды, плотность теплового потока.

Производство объектов с гуммированным покрытием сопряжено с необходимостью равномерного охлаждения капиллярно-пористого материала. Для этого на поверхность материала распыляется охлаждающая жидкость. От параметров струи подаваемой воды зависят эксплуатационные свойства готового объекта, поэтому требуется анализ процессов теплообмена и проведение теплотехнических исследований.

Исследования теплообмена при жидкостном охлаждении гуммированного объекта ведутся, как правило, в двух направлениях – охлаждение плоского горизонтально и вертикально расположенного гуммированного объекта. Процессы, происходящие при охлаждении вертикально расположенного гуммированного объекта, были рассмотрены в работе [1].

Исследование зависимости суммарного коэффициента теплоотдачи от величины расхода охлаждающей воды при охлаждении горизонтально расположенного гуммированного объекта, отнесенного к площади охлаждаемой поверхности, было проведено на экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 1.

Модель охлаждаемого полотна служит полоса (3) из стали Ст.3, покрытой эластомером. Нагрев ее производится переменным током от трансформатора (14). Напряжение на первичную обмотку трансформатора подается через ЛАТР (15) от автономного источника питания: двигатель – синхронный генератор (16). Под охлаждаемой полосой установлен компенсационный нагреватель (4), питаемый постоянным током. Полоса и компенсационный нагреватель разделены асбестовой подложкой (5). С целью уменьшения отвода тепла от нагреваемой полосы в токоподводящие шины (1) и (13) последние выполнены из стали Х18Н9Т, имеющей низкий коэффициент теплопроводности. Шина (1) может перемещаться под действием натяжного устройства (2), компенсируя тепловые расширения полосы. Подача воды осуществляется посредством калиброванных трубок (9), закрепленных в коллекторе (10). Конструкция крепления коллектора позволяет перемещать его в вертикальной плоскости и фиксировать в требуемом положении.

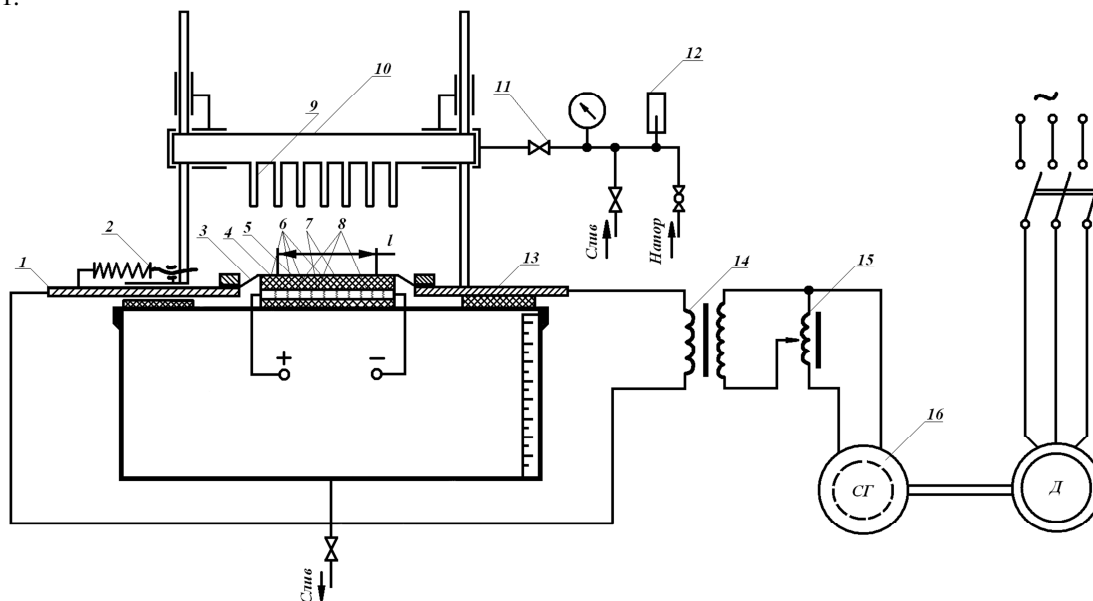


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Расход воды регулируется вентилем (11), а также посредством смены комплектов калиброванных трубок.

Проведение эксперимента заключается в следующем. На стационарном режиме при определенном расходе воды измеряется электрическая мощность, потребляемая на мерном участке полосы (1). Тепловой поток на этом участке подсчитывается по формуле

$$Q = I \cdot \Delta E,$$

где  $Q$  – тепловой поток, Вт;  $I$  – ток в цепи нагрева, А;  $\Delta E$  – падение напряжения на мерном участке, В.

Расход охлаждающей воды замеряется объемным методом: температура ее измеряется ртутным термометром (12) с ценой деления шкалы 0,1 К.

Температура полосы замеряется семью хромель-копелевыми термопарами (6, 7, 8), установленными вдоль полосы. Две крайние термопары расположены за пределами мерного участка и позволяют контролировать утечки тепла:

$$Q_{ут} = \frac{T_{cp} - T_n}{\lambda_n} \cdot A,$$

где  $Q_{ут}$  – тепловой поток в подложку, Вт;  $T_n$  – температура в среднем по высоте сечений, К;  $\delta$  – высота подложки, м;  $\lambda_n$  – коэффициент теплопроводности асбеста, Вт/м·К;  $A$  – площадь поверхности мерного участка, м<sup>2</sup>.

Среднюю температуру поверхности наружной полосы находят путем решения дифференциального уравнения теплопроводности для одномерного ста-

онарного температурного поля при наличии внутренних источников теплоты:

$$\lambda_{об} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q_v = 0, \quad (1)$$

где  $x$  – координата по направлению нормали к охлаждаемой поверхности, м;  $q$  – объемная плотность тепловых источников, Вт/м<sup>3</sup>, при следующих граничных условиях:

$$x = 0, \quad T = T_{cp}, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0.$$

Средний суммарный коэффициент теплоотдачи, учитывающий теплообмен при струйном охлаждении, конвекцию и излучение, определяется по формуле

$$\alpha = \frac{Q - Q_{ут}}{(T_{ст} - T_{ж})A}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – средний суммарный коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $T_{ст}$  – температура наружной поверхности полосы, К;  $T_{ж}$  – температура охлаждающей воды, К.

Эксперименты проводились при средних температурах 423 и 473 К. Полученная зависимость коэффициента теплоотдачи от удельного расхода воды представлена на рисунке 2. Точки соответствуют  $T_{cp} = 373$  К, кружки  $T_{cp} = 473$  К. Из рассмотрения кривой можно сделать вывод, что коэффициент теплоотдачи в указанных пределах не зависит от температуры, а в основном определяется расходом воды.

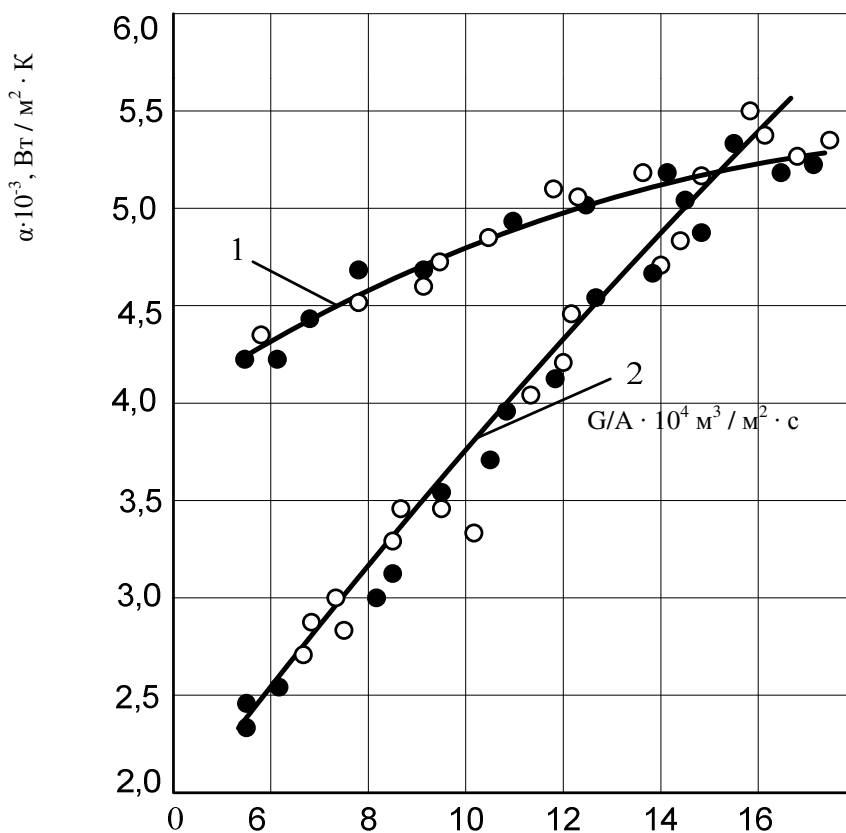


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи от удельного расхода воды:

1 – с сеткой № 5 ( $d_n = 0,32$  мм,  $a_c = 1,00$  мм,  $\Pi = 0,57$ ), 2 – без сетки;

● –  $T_{cp} = 473$  К, ○ –  $T_{cp} = 373$  К

### Оценка эффективности охлаждения гуммировочного покрытия при использовании капиллярно-пористого материала

Анализ теплофизических процессов при охлаждении горизонтально расположенного гуммировочного объекта показал, что структура теплообменной системы несовершенна.

Главный ее недостаток заключается в разбрызгивании жидкости за пределами пятна растекания. Струйное охлаждение, таким образом, приводит к ограниченному по интенсивности теплосъему в отдельных пятнах растекания под каждой струей. В этих условиях площадь теплосъема равна суммарной площади пятен растекания.

Поэтому под поверхностью охлаждения следует понимать площадь охлаждаемой поверхности гуммированного материала, рассчитываемую как  $V_{рмп} \cdot L_{охл}$ , где  $V_{рмп}$  – ширина резинометаллической полосы,  $L_{охл}$  – длина участка охлаждения, а эффективная поверхность теплосъема, равна, как было сказано выше, сумме площадей пятен растекания.

Несовершенство структуры теплообменной системы может быть устранено введением в контакт с охлаждаемой гуммированной полосой полый охлаждающей детали, полость которой, по меньшей мере частично заполнена имеющим пустоты наполнителем – капиллярно-пористым материалом, и подачей в полость и отвод из нее воды. В качестве наполнителя можно использовать дисперсную структуру.

Предложено располагать капиллярно-пористый материал непосредственно на движущейся гуммированной поверхности в зоне подачи струй охлаждающей жидкости. Для этого наиболее удобно использовать тканую проволочную сетку, так как она обладает легкостью, мягкостью и не препятствует прохождению полосы по роликам. В опытах применялись сетки, типоразмеры которых показаны в таблице. Параметрами сеток являются: диаметр проволоки  $d_n$ , размер ячеек  $a_c$ , ячеистость  $\Pi$ , рассчитываемая по формуле

$$\Pi = \frac{a_c^2}{(a_c + d_n)^2}.$$

Таблица

#### Геометрические характеристики капиллярно-пористого материала

№ сетки	Диаметр проволоки $d_n$ , мм	Размер ячеек $a_c$ , мм	Ячеистость $\Pi$
1	0,25	0,40	0,37
2	0,30	0,50	0,39
3	0,25	0,63	0,51
4	0,32	0,80	0,51
5	0,32	1,00	0,57
6	0,40	1,20	0,56
7	0,36	1,40	0,63
8	0,55	1,40	0,51
9	0,40	1,60	0,64
10	0,70	2,00	0,51
11	1,00	2,00	0,44

Исследование производилось на экспериментальной установке. На рисунке 3 приведена схема, поясняющая методику эксперимента.

Охлаждаемый образец препарирован датчиком поверхностной температуры, показанным на рисунке 4. Термоэлектрод (1) выточен из хромеля. Другой термоэлектрод (2) представляет собой копелевую проволоку, изолированную слоем окиси, которую получают предварительным нагревом проволоки электрическим током. Использовалась хромелевая проволока диаметром 0,0002 м. При сборке датчика убеждались в отсутствии электрического контакта между электродами. Копелевый термоэлектрод продевался через керамическую трубку (3) с наружным диаметром 1,0 мм. Зазоры заполнялись силикатной пастой этилсиликат для фиксации центрального термоэлектрода. После сушки пасты и проверки изоляции алюминиевая проволока откусывалась на расстоянии 1,0 мм от торца датчика. В образце (4) сверлом, профилированным по форме датчика, высверлено отверстие с незначительной конусностью. После шлифовки торца датчика вместе с поверхностью теплообмена между двумя термоэлектродами появляется электрический контакт из-за взаимного внедрения материала термоэлектродов.

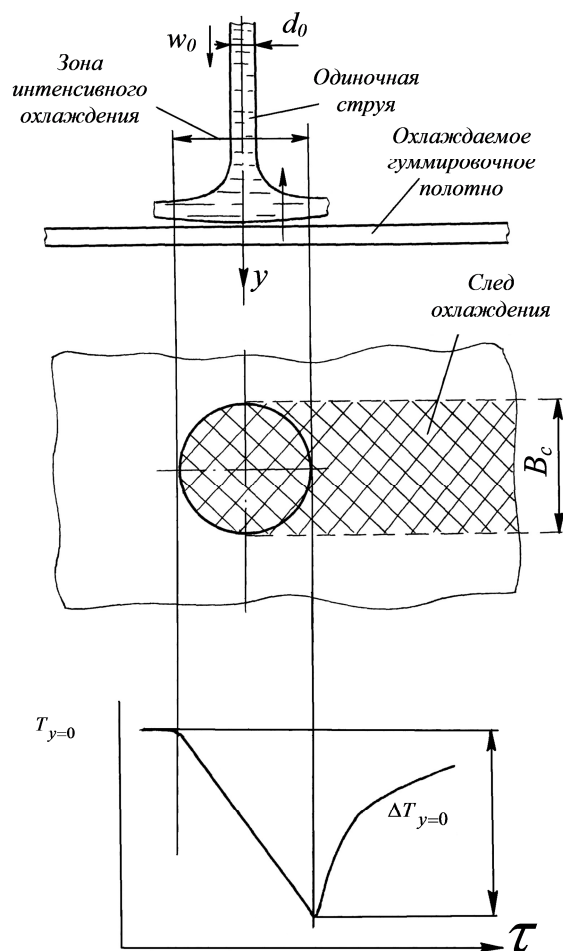


Рис. 3. Схема, поясняющая методику эксперимента

Динамические характеристики датчика определяли методом монотонного нагрева с подачей в момент времени  $\tau = 0$  постоянной тепловой нагрузки. Время задержки выхода кривой  $T(\tau)$  составляет 0,001 с, т.е. для нестационарных процессов с постоянной времени порядка 0,1 с датчик практически безынерционный. Показания датчика фиксируются осциллографом

Н-115, гальванометром М005-03, рабочая полоса частот 0–180 Гц. На глубине 0,5 мм от охлаждаемой поверхности зачеканен спай хромель-копелевой термомпары (5) (рис. 4). Диаметры выходных отверстий сопел менялись в пределах от 1,0 до 4,5 мм.

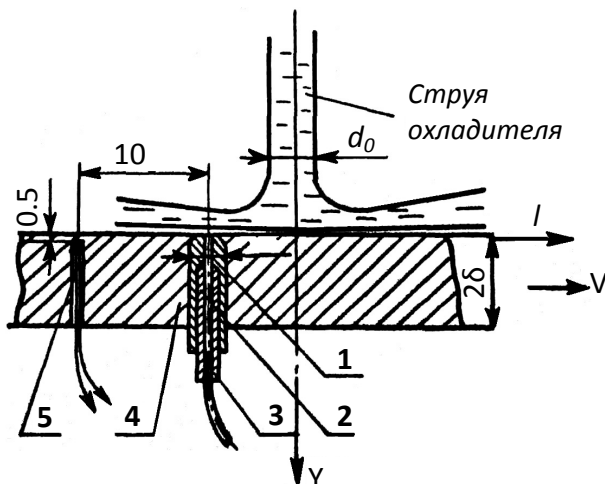


Рис. 4. Датчик определения поверхностной температуры охлаждаемого полотна

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Включали насос, устанавливали сетку, определяли скорость истечения и температуру воды. После достижения образцом температуры 423 К включали привод перемещения.

Образец двигался под струей, на выходе из зоны охлаждения фотографировали темный след охлаждения. В результате получали изображения следа в масштабе 1:1, по которым определяли путь охлаждения под струей, который для осесимметричной струи равен ширине следа охлаждения под струей  $B_c$ . Зная скорость движения образца, определяли время охлаждения. Для каждого опыта записывали кривые изменения температуры на поверхности и на глубине 0,5 мм. Рассматривая образец толщиной  $2\delta$  как полупространство с теплоотдающей поверхностью при  $Y=0$ , движущийся со скоростью  $\omega$ , можно считать, что для точки поверхности, пересекающей при своем движении ось струи, время охлаждения, в течение которого точка поверхности испытывает охлаждение с постоянной плотностью теплового потока  $q_{стр}$ , составит величину  $\tau$  [2–4].

Величина  $\tau$  имеет порядок 0,1 с, поэтому можно считать, что тепловой поток  $q_{стр}$  распространяется в пространстве только в направлении оси  $Y$  без оттоков тепла с периферийных боковых областей. Задача, поставленная в таких условиях, имеет известное решение, связывающее изменение во времени температуры  $T_{y=0}$  полубесконечной пластины с величиной действующего теплового потока [5].

$$q_{стр} = \frac{\Delta T_{y=0} \sqrt{\pi \lambda c \rho}}{\sqrt{\tau}}, \quad (3)$$

где  $\Delta T_{y=0} = T_n - T_k$  – максимальное падение температуры поверхности, отсчитываемой от начальной температуры  $T_n$  до конечной  $T_k$ ;  $\pi \lambda c \rho$  – коэффициенты тепловой активности гуммировочного покрытия.

Подставив  $\tau$  как отношение длины зоны охлаждения к скорости движения образца:

$$\tau = \frac{B_c}{V},$$

получим:

$$q_{стр} = \frac{\Delta T_{y=0} \sqrt{\pi \lambda c \rho V}}{\sqrt{B_c}}. \quad (4)$$

Тепловой поток, снимаемый струей с гуммировочного покрытия, рассчитывается по формуле

$$Q = q \cdot A, \quad (5)$$

где  $A$  – площадь зоны интенсивного теплообмена, определяемая выражением

$$A = \frac{\pi B_c^2}{4}.$$

Проверка экспериментальной методики проводилась по тепловому балансу воды. Для этого отраженная от поверхности вода собиралась специальным лотком, выполненным из алюминиевой фольги, на сливе которого измерялась температура отводимой воды.

Тепловой поток, снимаемый струей воды, рассчитывался по зависимости

$$q_{стр} = \frac{1}{A} Q_c = c_{ж} \rho_{ж} G_0 (T_{сл} - T_{ж}) \frac{1}{A}, \quad (6)$$

где  $T_{ж}$  – начальная температура жидкости в струе;  $T_{сл}$  – температура воды, замеряемая на сливе лотка, К;  $c_{ж}$  – теплоемкость, Дж/кг;  $\rho_{ж}$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Оценку эффективности охлаждения производили по соотношению

$$\frac{Q_{cc}}{Q_{bc}},$$

где  $Q_{cc}$  – теплосъем с сеткой;  $Q_{bc}$  – без сетки. В обоих случаях теплосъем рассчитывали по выражению (5), а плотность теплового потока – по (4).

Исследовалось влияние типоразмера сетки и числа ее слоев на теплосъем. Полученные результаты приведены на рисунке 5 для случая, давшего наилучший (сетка № 5) и наихудший (сетка № 1) результаты. Остальные сетки занимают промежуточное положение.

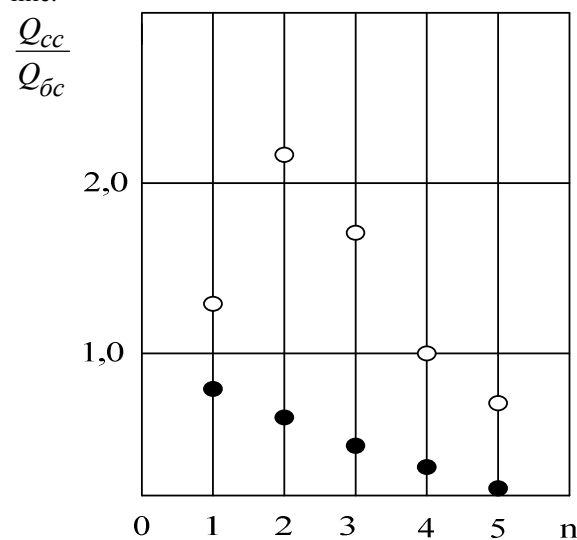


Рис. 5. Влияние числа слоев сеток на теплосъем:  $d_0 = 3$  мм,  $Re = 10-425$ ,  $\circ$  – сетка № 5,  $\bullet$  – сетка № 1

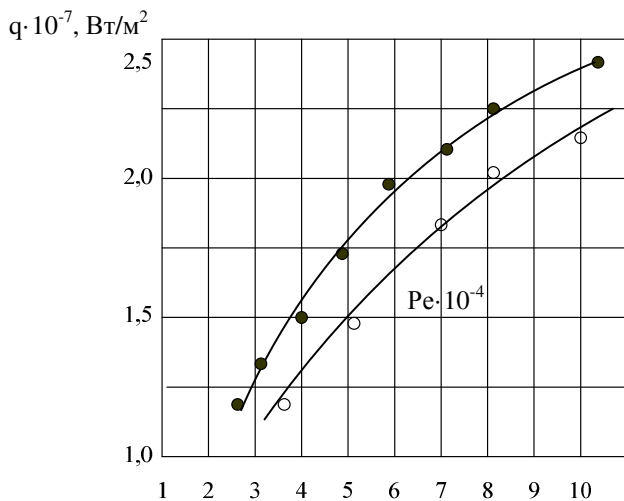


Рис. 6. Плотность теплового потока при охлаждении:  
 ● – с сеткой № 5 ( $d_n = 0,32$  мм,  $a_c = 1,00$  мм,  $\Pi = 0,57$ ),  
 ○ – без сетки

Сравнительные результаты по величине  $q_{стр}$  для двухслойной сетки № 5 показаны на рисунке 6. Из опытов видно, что для любых режимов истечения струй воды плотность теплового потока при использовании сетки меньше, чем без сетки. Обработка данных (рис. 7) показала, что теплосъем с металла повышается с увеличением расхода в обоих случаях.

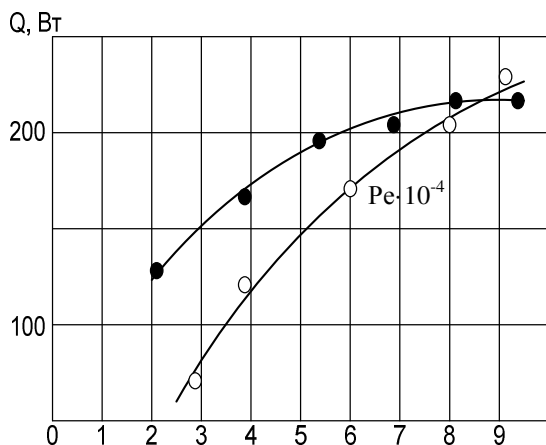


Рис. 7. Теплосъем при охлаждении:  
 ● – с сеткой № 5 ( $d_n = 0,32$  мм,  $a_c = 1,00$  мм,  $\Pi = 0,57$ ),  
 ○ – без сетки

Однако в области малых расходов теплосъем с сеткой значительно выше, чем без сетки. При увеличении расхода воды в струях они сближаются и становятся одинаковыми.

Влияние сетки сказывается на струйном теплообмене следующим образом. Сетка, являясь капиллярно-пористым телом, изменяет гидродинамику потока жидкости. Как уже говорилось, высокая интенсивность теплообмена непосредственно под струей обусловлена наличием продольных и поперечных градиентов скорости жидкости при натекании на стенку. Размещение сетки уменьшает влияние продольных градиентов скорости. Этим объясняется меньшая интенсивность охлаждения гуммированного полотна под сеткой по сравнению с чистой поверхно-

стью. С другой стороны, в зоне растекания сетка турбулизирует поток, генерируя продольные градиенты скорости, которые отсутствуют в случае растекания без сетки. Поэтому при охлаждении с сеткой происходит увеличение эффективности поверхности охлаждения и возрастание за счет этого отводимого теплового потока.

Эксперименты с различным числом слоев сеток показали, что наибольшей эффективностью обладают сетки, расположенные на поверхности 2 слоя. При большом числе слоев вода растекается поверх сеток, так как они создают значительное гидравлическое сопротивление, при меньшем числе – сетка слишком тонка и не образует капиллярно-пористой структуры. Все последующие опыты проводились для двухслойных сеток. Сеточная структура, состоящая из двух слоев сетки, показана на рисунке 8.

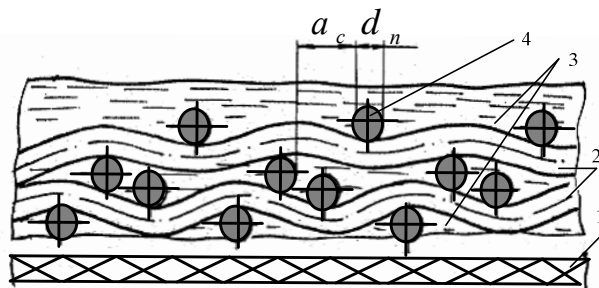


Рис. 8. Сеточная структура, состоящая из двух слоев сетки: 1 – гуммированный объект, 2 – слой сетки, 3 – охлаждающая жидкость, 4 – проволока основы сетки

Таким образом, согласно полученным результатам применение нового способа обеспечивает увеличение теплосъема с поверхности покрытия в 1,5÷2,5 раза. Это имеет место при размерах ячеек сетки 0,63÷1,2 мм и режиме истечения струй, соответствующем числу  $Re = (2,7 \div 3,0) \cdot 10^4$ . Поэтому применение нового способа дает возможность одновременно со снижением скорости истечения воды сократить ее расход. Увеличение теплосъема дает возможность для более эффективного управления охлаждением и расширения диапазона регулирования. Кроме того, более высокая скорость охлаждения и повышенная эффективная поверхность теплосъема дают возможность сократить длину участка охлаждения в поточной линии.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований теплообмена при охлаждении плоского горизонтально расположенного гуммированного изделия:

- получены критериальные зависимости, позволяющие рассчитывать коэффициент теплоотдачи;
- найдена зависимость коэффициента теплоотдачи от удельного расхода воды, из чего можно сделать вывод, что коэффициент теплоотдачи при средних температурах 423 и 473 К не зависит от температуры, а в основном определяется расходом воды;
- предложено решение по устранению несовершенства теплообменной системы за счет введения в контакт с охлаждаемой гуммированной полосой полость охлаждающей детали, полость которой частично

заполнена имеющим пустоты капиллярно-пористым материалом. Для этого наиболее удобно использовать тканую проволочную сетку, так как она обладает легкостью, мягкостью и не препятствует прохождению полосы по роликам автоматизированной поточной линии для гуммирования.

Предложенные решения позволяют улучшить равномерность охлаждения производимых объектов и повысить качество соединения склеиваемых материалов.

#### Литература

1. Кочкарева, Т. А. Исследование конвективного теплообмена при жидкостном охлаждении плоского вертикально расположенного гуммированного объекта / Н. А. Бормосов, А. Ю. Беянина // Вестник Вологодского государственного университета. – 2021. – № 2 (12). – С. 7–11.

2. Вопилов, В. Н. Интенсивность теплообмена

при душировании горячекатанного листа / В. Н. Вопилов, В. Г. Лабейш // Теория и практика производства широкополосной стали. – Москва : Энергия, 1979. – С. 17–22.

3. Вопилов, В. Н. Исследование теплообмена при струйном жидкостном охлаждении высокотемпературной поверхности : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вопилов Владимир Николаевич. – Ленинград, 1977. – 20 с.

4. К исследованию процесса теплообмена при струйном охлаждении листа на стане 1700 / В. Н. Вопилов, А. Н. Шичков, Я. А. Бурштейн, В. С. Тюшев // Сборник научных трудов / Северо-Западный политехнический институт. Ленинград. – 1970. – № II. – С. 71–75.

5. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 600 с.

*N.A. Bormosov, T.A. Kochkareva, A.Yu. Belyanina*  
*Vologda State University*

#### STUDY OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN GUMMED COATING OBJECTS MANUFACTURE

Studies of heat transfer during liquid cooling of a flat, horizontally located, rubberized object were carried out.

The main characteristic features of the process under study are established, the influence of individual determining parameters on the intensity of heat transfer is assessed for further experimental studies designed to develop practical generalized recommendations.

Flat, horizontally located, rubberized object, density, heat capacity, thermal conductivity coefficient, heat transfer coefficient, capillary-porous material, cooling surface, water consumption, heat flux density.



## ИЗМЕНЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ПЕРЕКРЕСТКЕ УЛИЦ КОНЕВА И МОЖАЙСКОГО В Г. ВОЛОГДЕ ПОСЛЕ ОРГАНИЗАЦИИ КОЛЬЦЕВОГО ПЕРЕСЕЧЕНИЯ

В данной статье представлен сравнительный анализ изменения пропускной способности перекрестка после организации кругового пересечения в смежных временных интервалах при той же транспортной потребности. Изучено, как изменилась пропускная способность каждого направления в отдельности и всего перекрестка в целом. Обоснованы ограничения применения кольцевых пересечений.

Пропускная способность, кольцевое пересечение.

В августе 2020 года на одном из перекрестков г. Вологды было установлено кольцевое пересечение. У нас имеются данные обследования транспортных потоков на этом перекрестке до реализации мероприятия и после. Данные собраны в декабре 2019 года и октябре 2020 года – «до» и «между» ограничительными мероприятиями по COVID-19.

Исследованию подлежит изучение изменения пропускной способности, транспортных потоков и аварийности на данном перекрестке. Для исследования применяются методы натуральных визуальных наблюдений с использованием онлайн-сервисов [4] и данные Комплексной системы организации дорожного движения в г. Вологде [1].

Основной выезжающий поток (54 % или 2069 авто) следует со всех спальных районов в сторону тоннеля (центра) (направление 1). Из тоннеля выезжает 27 % автомобилей. Самый большой входящий поток – с улицы Конева (33 % или 1258 авто). С двух направлений ул. Можайского значительные транспортные потоки (23 и 17 % соответственно). Данный перекресток является пересечением двух дорог с интенсивностью движения 2281 автомобиль в час (до 38 000 автомобилей в сутки [3]) с направления Конева – Тоннель и 1549 автомобилей (до 25 000 автомобилей в сутки [3]) со второстепенной улицы (Можайского).

Цикл светофорного регулирования составляет 120 секунд. Разрешающий сигнал светофора с направления 2 (со стороны ул. Конева с максимальным транспортным потоком) составлял 42 секунды (разрешающая поворот направо стрелка никакой роли не играла и обслуживала не более 0,3 % потока). За это время перекресток в среднем проезжало 41,9 автомобиля.

Проезд с направления 3 (со стороны ул. Можайского от ул. Текстильщиков) затруднений не вызывал. Под стрелку повернуть в тоннель успевал практически весь транспортный поток. При движении прямо 256 автомобилей в час за 19 секунд за цикл проезжали без особых задержек.

Значительные затруднения возникали при проезде перекрестка с направления 4 (со стороны ул. Можайского от ул. Береговой). Основной поток (44 %) поворачивал налево в тоннель, а в соответствии с принятой схемой регулирования должен был пропустить все встречные автомобили. При этом за достаточно длительный цикл успевало повернуть (заканчивая движения при горящем красном) в среднем 9,7 автомобиля (влезая в несколько рядов и провоцируя столкновения). Данный маневр являлся основной причиной ДТП с погибшими и ранеными на этом перекрестке.

Таблица 1

**Транспортные потоки до введения кольцевого движения**

Направление въезда на перекресток	№ направления	Направление выезда с перекрестка				Всего въезд
		Тоннель (направо на рис. 1)	Ул. Конева (налево на рис. 1)	Можайского к ул. Текстильщиков (вниз на рис. 1)	Можайского к ул. Береговой (вверх на рис. 1)	
Тоннель (центр)	1	-	517 (51 %)	349 (34 %)	157 (15 %)	1023 (27 %)
Ул. Конева	2	1166 (93 %)	-	4 (0 %)	88 (7 %)	1258 (33 %)
Можайского (ул. Текстильщиков)	3	614 (68 %)	27 (3 %)	-	256 (29 %)	897 (23 %)
Можайского (ул. Береговая)	4	289 (44 %)	161 (25 %)	202 (31 %)	-	652 (17 %)
Всего выезд		2069 (54 %)	705 (18 %)	555 (15 %)	501 (13 %)	3830 (100 %)



Рис. 1. Кольцевое пересечение на перекрестке

Таблица 2

**Транспортные потоки после организации кольцевого движения**

Направление въезда на перекресток	№ направления	Авто/час	Авто/120 сек цикл		
			После внедрения кольца	До внедрения кольца	Изменение
Тоннель (центр)	1	1065	35,5	34,1	+ 4,1 %
Ул. Конева	2	1178	39,3	41,9	-6,4 %
Можайского (ул. Текстильщиков)	3	802	26,7	29,9	-10,6 %
Можайского (ул. Береговая)	4	723	24,1	21,7	+10,9 %
Всего		3 768	125,6	127,7	-1,6 %

С направления 1 (из тоннеля) разрешающий сигнал светофора горел 58 секунд (при потоке 1023 авто), против 42 секунд со стороны Конева (при 1258 авто). Кроме того, направо работала стрелка, пропуская дополнительно до 15 % (157 авто) потока в направлении 4 (на ул. Можайского в сторону ул. Береговая). При этом для 34 % потока направления (349 авто) с поворотом «налево» в направление 3 (ул. Можайского в сторону ул. Текстильщиков) возникали сложности, несмотря на выделение 58-42=16 секунд задержки встречного потока со стороны ул. Конева.

Организацию светофорного регулирования до введения кольцевого перекрестка следует признать неудовлетворительной. Для повышения пропускной способности, сокращения заторов и обеспечения БДД нужно было увеличить продолжительность разрешающего сигнала со стороны направления с максимальным потоком (от ул. Конева) за счет направления «из тоннеля». Для направления 3 со стороны ул. Можайского можно было сделать задержку встречного потока, чтобы необходимое количество автомобилей успели повернуть и сделали это безопасно.

Вместо оптимизации работы светофора руководством города было принято решение организовать на перекрестке кольцевое движение (рис. 1).

Транспортные потоки несколько изменились после изменения схемы движения. Они представлены в

таблице 2. Особенность обследования транспортных потоков на кольцевых пересечениях заключается в том, что определяются только входящий и выходящий потоки для каждого направления. При этом корреспонденции автомобилей между направлениями определить практически невозможно.

На кольцевом пересечении беспрепятственный выезд в нужном направлении обеспечивается приоритетом находящихся на кольце АТС и ограничивается только тем, скольким автомобилям нужно выехать в этом направлении. Въезд ограничивается приоритетом находящихся на кольце АТС и возможен только в разрывы транспортного потока.

На рисунке 2 приведены картограммы транспортных потоков на перекрестке.

Общая пропускная способность перекрестка после реализации мероприятия сократилась на 1,6 %, что, казалось бы, относительно немного.

Въезд на кольцо со стороны тоннеля увеличился за счет того, что выезд в тоннель в размере 2069 автомобилей в час создает достаточно разрывов для въезда на круг 1065 авто без значительных задержек. Пропустить необходимо лишь 371 автомобиль. Малое увеличение пропускной способности (всего на 4,1 %) объясняется практически полным отсутствием заторов с направления до реализации мероприятия (кроме поворота налево в направление 3).

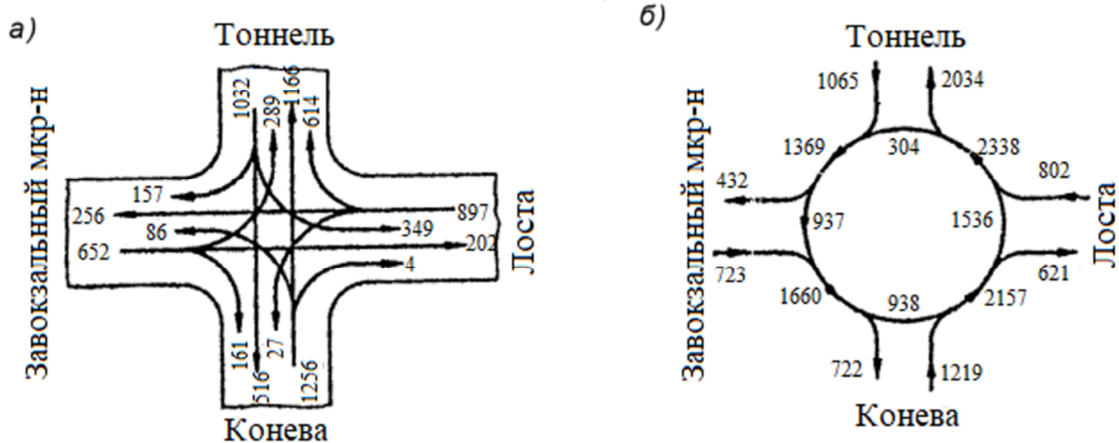


Рис. 2. Картограммы транспортных потоков:  
а – со светофорным регулированием, б – кольцевое движение

Въезд на перекресток с направления 4 (ул. Можайского, справа) 723 автомобилей увеличился на 10,9 % за цикл благодаря отсутствию запрещающего сигнала и необходимости пропустить всего 893 автомобиля. Небольшие входящий и проходящий (который нужно пропустить) транспортные потоки позволяют въехать на перекресток с этого направления практически беспрепятственно.

С направления 2 (с ул. Конева) въезд сократился на 6,4 %. С учетом того что с этого направления имеется самый большой транспортный поток, самый большой затор до введения мероприятия – сокращение пропускной способности еще на 6,4 % – это неоправданно много. С учетом увеличивающейся застройки в районе ул. Конева – ситуация будет ухудшаться. На самом деле ситуация с пропускной способностью направления еще хуже. Дело в том, что из-за увеличившихся заторов с направления многие жители района стали выезжать на работу заранее – до возникновения заторов (с увеличением пропускной способности в начале часа до 65 авто/цикл). В пиковый временной отрезок с 7:30 до 8:00 средняя пропускная способность направления падает до 36 авто/цикл (на 14,1 %), что увеличивает и без того большой затор.

При въезде на кольцо с направления 3 (ул. Можайского, слева) необходимо пропустить 1510 проезжающих по кольцу автомобилей, следующих плотным потоком. Въезд на кольцо с этого направления становится возможен только в момент выезда с кольца в этом же направлении 1 или нескольких автомобилей. Между въездом и выездом с этого направления имеется средняя корреляционная зависимость (коэф. корреляции 0,71). На 615 выезжающих авто успевает въехать 802 авто с направления. Пропускная способность уменьшилась на 10,6 %, затор с направления увеличился.

Таким образом, с самого напряженного проблемного направления 2 (ул. Конева) проезд стал хуже. С беспрепятственного направления 1 (тоннель) проезд стал чуть лучше. С беспрепятственного направления 4 (ул. Можайского, слева) проезд ухудшился. С самого мало напряженного проблемного направления 3 (ул. Можайского, справа) проезд перекрестка улучшился.

В целом транспортная ситуация после введения кольцевого движения на перекрестке стала хуже.

Выводы:

1. Все мероприятия по ОДД должны быть тщательно проработаны до их реализации (изучены транспортные потоки, построены картограммы, подобраны компоновочные решения, выполнен раздел БДД). Пропускная способность кольцевого перекрестка зависит от размеров и входящих и выходящих транспортных потоков с каждого из направлений и для каждого перекрестка должна разрабатываться индивидуально.

2. Стандартное двухполосное кольцо с въездами из двух полос с каждого направления способно пропускать до 3500–4000 автомобилей в час.

3. Для отсутствия заторов с любого направления должно выполняться условие: пропускная способность направления больше или равна интенсивности входящего транспортного потока. Если условие не выполняется, фактически проходящий транспортный поток сравнивается с пропускной способностью, а превышение интенсивности входящего потока пропускной способности вызывает возникновение и увеличение заторов.

### Литература

1. Об утверждении Комплексной схемы организации дорожного движения на улично-дорожной сети муниципального образования «Город Вологда»: Постановление Администрации города Вологды от 30.10.2019 № 1533. – Текст : электронный. // Официальный сайт Администрации города Вологды (дата обращения: 15.03.2020). – Режим доступа : свободный.

2. ОДМ 218.6.003-2011. Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах : издан на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 27.02.2013 № 236-р. – Текст : электронный. // Техэксперт: информационно-справочная система / Консорциум «Кодекс» (дата обращения: 15.05.2020). – Режим доступа : для авториз. пользователей.

3. ОДМ 218.2.020-2012. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог : издан на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 17.02.2012 № 49-р. – Текст : электронный. // Техэксперт: информационно-справочная система / Консорциум «Ко-

декс» (дата обращения: 15.05.2020). – Режим доступа : для авториз. пользователей.

4. Online Камеры в Вологде / домашний интернет Baza.net – URL: <https://baza.net/camera> (дата обращения 4.02.2019). – Текст : электронный.

*A.V. Vostrov, A.O. Botkov, V.A. Gubin, V.A. Galochkin*  
*Vologda State University*

#### **TRAFFIC FLOWS CHANGES AT THE INTERSECTION OF KONEVA AND MOZHAISKY STREETS IN VOLOGDA AFTER ROUNDABOUT ORGANIZATION**

This article presents a comparative analysis of the change in the capacity of the intersection after the organization of a circular intersection in adjacent time intervals with the same transport needs. The way the throughput has changed from each direction individually and the entire intersection as a whole has been studied. The limitations of the use of ring intersections are justified.

Throughput capacity, roundabout.



### АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ И ПРЕДЕЛЬНОЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ НА КОЛЬЦЕВОМ ПЕРЕСЕЧЕНИИ УЛИЦ КОНЕВА И МОЖАЙСКОГО В Г. ВОЛОГДЕ

Изучается пропускная способность перекрестка с кольцевым пересечением. Определяется зависимость входящих на перекресток и проходящих по перекрестку транспортных потоков. Определяется предельная пропускная способность перекрестка с кольцевым движением.

Кольцевое движение на перекрестке, пропускная способность кольцевого перекрестка.

На перекрестке улиц Конева и Можайского в г. Вологде был проведен эксперимент по изменению схемы организации движения (ОДД), в котором после обычного светофорного регулирования было организовано круговое движение. Сокращение скоростей движения из-за искривления траекторий движения автомобилей привлекает владельцев дорог в реализации

подобных пересечений на всех перекрестках, вне зависимости от изменения пропускной способности и возможного возникновения заторов.

Цель исследования – определить предельную пропускную способность кругового пересечения и сферу ее возможного применения.

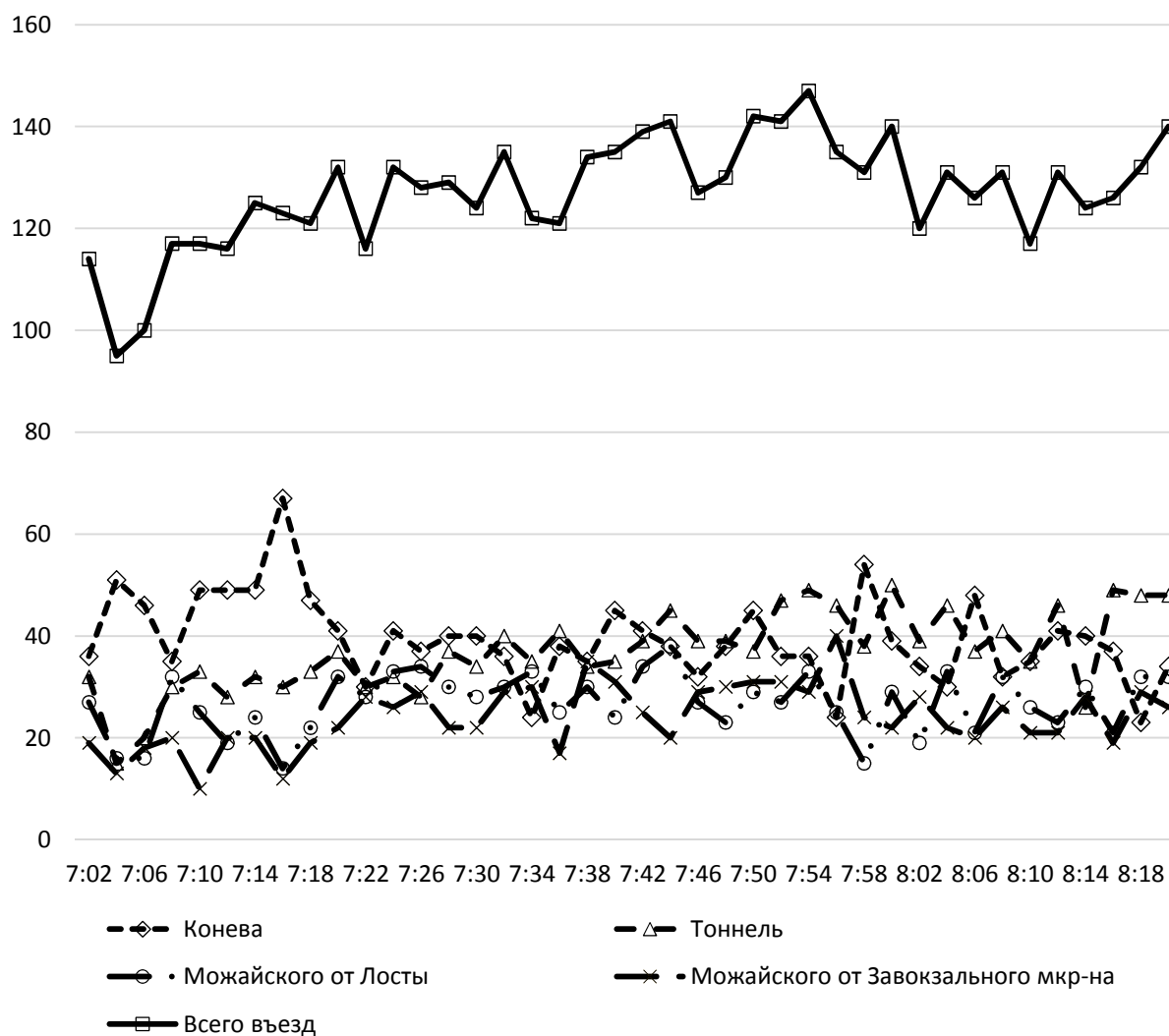


Рис. 1. Въезд на перекресток за цикл 120 секунд

Специалистами кафедры «Автомобили и автомобильное хозяйство» ВоГУ было произведено натурное визуальное обследование транспортных потоков до и после изменения схемы ОДД.

Входящий поток транспортных средств с направлений ул. Конева и ул. Можайского со стороны Лосты превышает пропускную способность и является причиной возникновения заторов. С остальных направлений заторов не наблюдается.

На рисунке 1 представлена зависимость того, сколько автомобилей въехало на перекресток со всех четырех сторон (Конева, тоннель, Можайского от Лосты, Можайского от Завокзального мкр-на).

Усредненная линия тренда показывает, что максимальное расчетное количество автомобилей, способное проехать перекресток, составляет 135 единиц за цикл в 120 секунд (147 автомобилей по фактическим данным). С учетом внутричасовой неравномерности транспортных потоков пропускная способность пересечения составляет до 3927 автомобилей в час. Максимальная пропускная способность за 30 минутный интервал составляет 2020 автомобилей (соответствует временному интервалу с 7:30 до 8:00). За 15 минутный интервал – 1035 автомобилей (соответствует временному интервалу с 7:40 до 7:55). Эти данные говорят о том, что предельная пропускная способность характерна для данного пересечения весь

промежуток времени с 7:00, хотя до реализации кольцевого пересечения заторов с 7:00 до 7:30 практически не было.

На рисунке 2 представлена зависимость въехавших на кольцо и съехавших с кольца автомобилей в направлении ул. Можайского со стороны Лосты. В условиях плотного транспортного потока в сторону тоннеля, перекрывающего въезд со стороны Лосты, въезд возможен только в промежутки между выезжающими с кольца автомобилями. Зависимость между данными входящего и выходящего потоков с данного направления во временном интервале с 7:00 до 8:20 (40 временных интервалов) характеризуется коэффициентом корреляции 0,713, что говорит о высокой положительной взаимной зависимости факторов по шкале Чеддока [1].

На рисунке 3 представлена зависимость въезда на кольцевое пересечение ТС с направлений ул. Конева и ул. Можайского от Завокзального мкр. Въезд с ул. Конева располагается после въезда с ул. Можайского со стороны Завокзального мкр. 75 % входящего с направления ул. Можайского транспортного потока (около 500 АТС) следуют через ул. Конева, препятствуя въезду ТС. Зависимость между въезжающими на кольцо АТС с данных направлений находится в высокой отрицательной связи по шкале Чеддока [1] с коэффициентом корреляции -0,616.

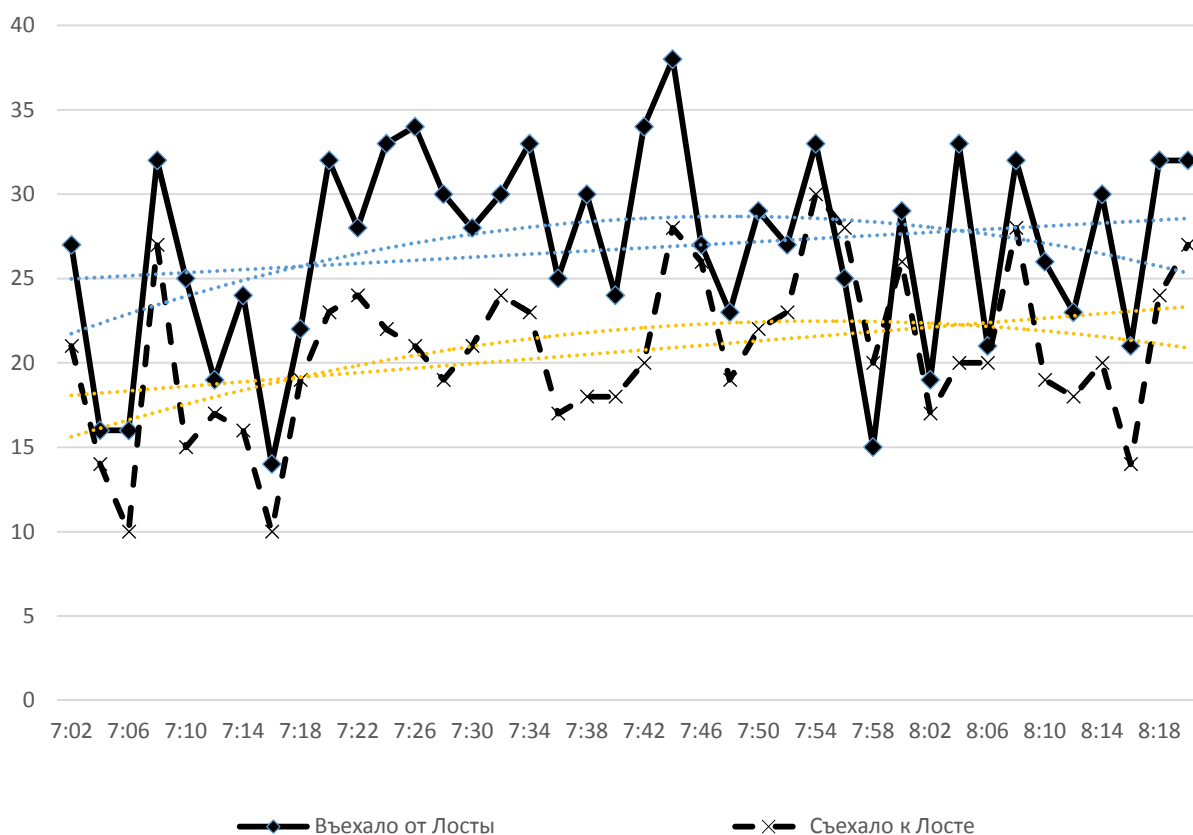


Рис. 2. Въезд и выезд в направлении ул. Можайского со стороны Лосты (120 секунд)

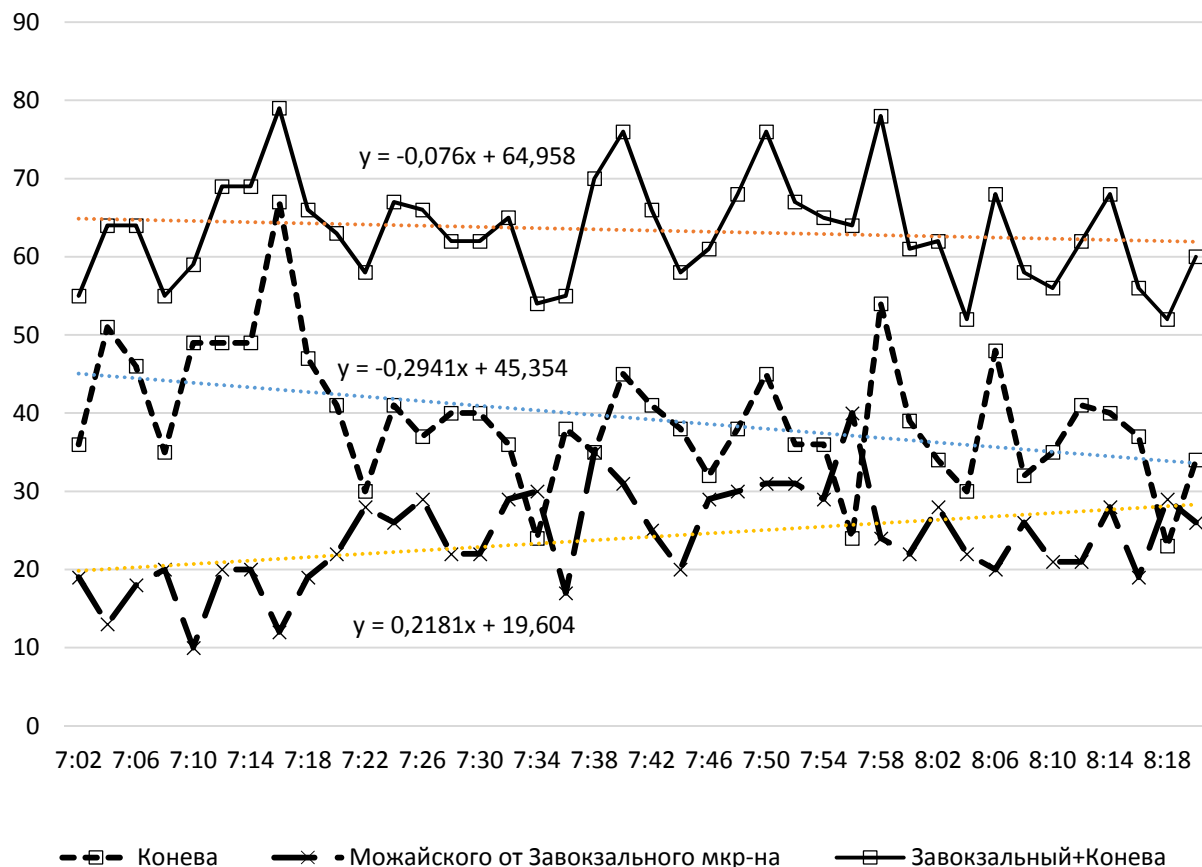


Рис. 3. Въезды ТС со стороны Конева и Можайского (от Завокзального мкр-на)

На протяжении всего обследуемого временного интервала (с 7:00 до 8:20) количество проезжающих АТС близко к пределу пропускных возможностей. 1000 АТС за 15 минут, 2000 АТС за 30 минут и 4000 АТС за 60 минут. При этом зависимость въезжающих с разных направлений АТС находится в сильной взаимной зависимости и саморегулируется, приближаясь к максимальной пропускной способности всего перекрестка. Кольцевое пересечение – саморегулирующийся объект, в отличие от перекрестка со светофорным регулированием, режим работы которого устанавливается искусственно.

Предельная пропускная способность кольцевого перекрестка составляет 1000 автомобилей за 15 минут. При этом саморегуляция и приоритет находящихся на перекрестке АТС могут практически перекрыть въезд с какого-либо направления. При светофорном регулировании доступ с каждого направления гарантируется разрешающей фазой.

При принятии решений об организации движения на перекрестках с использованием кольцевых пересечений необходимо делать расчеты и моделирование для обеспечения возможностей проезда АТС со всех направлений. На перекрестках с входящим транс-

портным потоком до 2500–3000 автомобилей в час время нахождения автомобиля в системе сократится, что позволит сократить время прохождения автомобилем перекрестка и повысит пропускную способность перекрестка. При входящем транспортном потоке более 3000–3500 автомобилей в час необходимо делать моделирование транспортных потоков, чтобы выявить отсутствие возникновения заторов для возможного внедрения кольцевого пересечения. При возникновении при моделировании заторов, превышающих заторы при светофорном регулировании, внедрение кольцевого пересечения недопустимо.

Вводить кольцевые пересечения для снижения аварийности без анализа изменения пропускной способности – не допустимо.

#### Литература

1. Удинцова, Н. М. Эконометрика. Часть 2. Множественная регрессия и корреляция в эконометрических исследованиях : учебное пособие / Н. М. Удинцова, Н. А. Коптева. – Зерноград : Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2016. – 73 с.

*A. V. Vostrov, A. O. Botkov*  
*Vologda State University*

**ANALYSIS OF TRAFFIC FLOWS AND MAXIMUM THROUGHPUT CAPACITY AT THE ROUNDABOUT  
OF KONEVA AND MOZHAISKY STREETS IN VOLOGDA**

The throughput capacity of an intersection with a roundabout is being studied. The dependence of traffic flows entering the intersection and passing through the intersection is determined. The maximum capacity of the intersection with the ring traffic is determined.

Ring traffic at the intersection, the throughput capacity of the roundabout.



### ВЛИЯНИЕ НАКЛОНА РЕШЕТ СОРТИРОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНУЮ МОЩНОСТЬ

В статье приводится пример расчета производительной мощности сортировальной машины в зависимости от наклона решет. В расчете учитывается трение сыпучего материала о решето, которое зависит от давления на поверхность. Это давление определяется двумя силами: гравитационной и инерционной. Поскольку ускорение решет является знакопеременным, сила давления меняется со временем.  $k_v$ -я часть сыпучего материала условно может считаться неподвижной относительно решетчатого стана и вносить вклад в инерционную нагрузку, а оставшаяся  $(1 - k_v)$ -я часть – подвижной и обеспечивать часть диссипативной нагрузки. Установлено, что угол наклона решет практически не влияет на величину средней диссипативной мощности, но искажает графики силы трения и мощности.

Сортировальная машина, решета, наклон, диссипативная мощность, трение, сыпучий материал.

Сортировальные машины используются в индустрии строительных материалов, горно-рудной промышленности, металлургии, сельском хозяйстве. Машина состоит из корпуса, привода и решет, под действием вибрации которых часть сыпучего материала просеивается, а часть «сходит».

В технологических целях решета сортировальных машин устанавливаются с небольшим наклоном. Известно, что угол наклона влияет на характеристики сортировальной машины, однако закономерности влияния не установлены. В этой связи целью работы является определение влияния наклона решет на диссипативную мощность решетчатых сортировальных машин [1, 2].

Рассмотрим кинематическую схему движения материала по наклонной плоскости решет.

Диссипативная мощность связана с трением, возникающим в подвижной относительно решет части сыпучего материала [3, 4]. Трение зависит от силы давления сыпучего материала на решета [5–7]. Это давление определяется двумя силами: гравитационной и инерционной. Поскольку ускорение решет является знакопеременным, сила давления меняется со временем. На рисунке 1 показана кинематическая схема движения материала по наклонной плоскости решет.

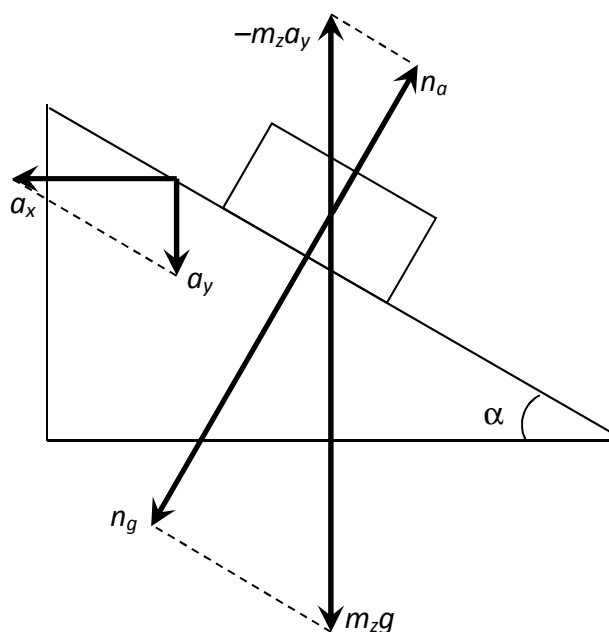


Рис. 1. Сила давления на решето

### Расчет силы давления зернового вороха на решет

Координата, скорость и ускорение решета равны:

$$\begin{aligned}x &= l \sin \omega t, \\v &= \dot{x} = l \omega \cos \omega t, \\a_x &= \ddot{x} = -l \omega^2 \sin \omega t,\end{aligned}$$

где  $l$  – амплитуда колебаний, м.;  $\omega$  – циклическая частота колебаний, рад/с [8, 9]. Вертикальное ускорение опоры (рис. 1) равно

$$a_y = a_x \operatorname{tg} \alpha = -l \omega^2 \sin \omega t \operatorname{tg} \alpha.$$

$k_v$ -я часть сыпучего материала условно может считаться неподвижной относительно решетного стана и вносить вклад в инерционную нагрузку, а оставшаяся  $(1 - k_v)$ -я часть – подвижной и обеспечивать часть диссипативной нагрузки [10].

Сила давления  $(1 - k_v)$ -й части сыпучего материала на решетку равна

$$\begin{aligned}n_z &= n_g - n_a = (1 - k_v) m_z g \cos \alpha - (1 - k_v) m_z (-a_y) \cos \alpha = \\&= (1 - k_v) m_z g \cos \alpha - (1 - k_v) m_z l \omega^2 \sin \omega t \operatorname{tg} \alpha \cos \alpha = \\&= (1 - k_v) m_z (g \cos \alpha - l \omega^2 \sin \omega t \sin \alpha).\end{aligned}$$

### Расчет диссипативной мощности

Диссипативная мощность, рассеиваемая в сыпучем материале, определяется выражением:

$$\begin{aligned}p &= \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} = k n_z \left( -\frac{\mathbf{v}}{v} \right) \cdot \mathbf{v} = \\&= k(1 - k_v) m_z \left( -\frac{\mathbf{v}}{v} \right) \cdot \mathbf{v} (g \cos \alpha - l \omega^2 \sin \omega t \sin \alpha) = \\&= k(1 - k_v) m_z (g \cos \alpha - l \omega^2 \sin \omega t \sin \alpha) l \omega |\cos \omega t|,\end{aligned}$$

где  $\mathbf{F}$  – сила трения,  $k$  – динамический коэффициент трения, который определяется опытным путем. Сила трения направлена противоположно скорости.

Диссипативная энергия, рассеиваемая в сыпучем материале за полупериод колебаний, равна

$$\begin{aligned}A_\pi &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} p dt = \\&= k(1 - k_v) m_z l \omega \left( g \cos \alpha \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \omega t dt - l \omega^2 \sin \alpha \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sin \omega t \cos \omega t dt \right) = \\&= k(1 - k_v) m_z l \omega \left( \frac{g}{\omega} \cos \alpha \sin \omega t \Big|_{-\pi/2}^{\pi/2} - l \omega \sin \alpha \frac{1}{2} \sin^2 \omega t \Big|_{-\pi/2}^{\pi/2} \right) = \\&= 2k(1 - k_v) m_z l g \cos \alpha.\end{aligned}$$

Средняя диссипативная мощность равна

$$P = 2nA_\pi = 4nk(1 - k_v) m_z l g \cos \alpha.$$

График диссипативной мощности представлен на рисунке 2.

**Пример.** Пусть  $\alpha = 7^\circ$ ,  $l = 7,5 \cdot 10^{-3}$  м, частота колебаний  $n = 8$  Гц,  $m_z = 40$  кг;  $k_v = 0,3$ ;  $k = 0,6$ . Средняя диссипативная мощность равна

$$\begin{aligned}P &= 4nk(1 - k_v) m_z l g \cos \alpha = \\&= 2 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 0,6(1 - 0,3)40 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot 0,99 \approx 39 \text{ Вт}.\end{aligned}$$

Таким образом, поскольку  $\cos 7^\circ \approx 0,993$ , угол наклона решетки практически не влияет на величину средней диссипативной мощности, но искажает графики силы трения и мощности.

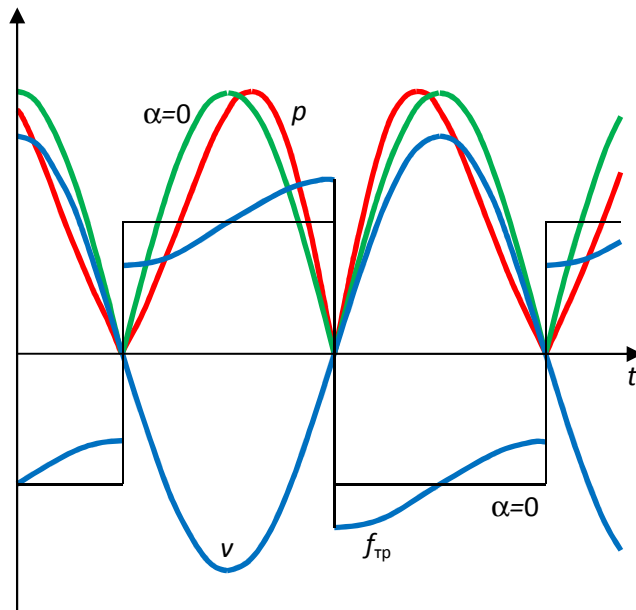


Рис. 2. Диссипативная мощность сортировальной машины

## Литература

1. Попов, И. П. Условно-ортогональные механические мощности / И. П. Попов // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – 2019. – № 4 (144). – С. 15–17.
2. Павлов, В. Д. О неоднозначности механической мощности / В. Д. Павлов // Advanced Engineering Research. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 24–29. – URL: <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-1-24-29> (дата обращения: 29.08.2022). – Текст : электронный.
3. Попов, И. П. Производительная мощность при сортировке сыпучих материалов / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 1 (7). – С. 70–72.
4. Попов, И. П. Диссипативная, реактивная и полная мощности виброприводов машин / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 3 (5). – С. 72–74.
5. Осипов, Ю. Р. Исследование кинетики смешивания древесных сыпучих материалов при изготовлении строительных материалов / Ю. Р. Осипов, К. С. Лукин // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 4 (6). – С. 70–73.
6. Степыко, Т. В. Модернизация системы сортировки и транспортировки агломерата в доменный цех в условиях АО «Уральская сталь» / Т. В. Степыко, А. В. Штах // Наука и производство Урала. – 2017. – № 13. – С. 31–33.
7. Сухов, С. И. Неизнашиваемые механические уплотнения Flowserve bulkite™ для порошковых и сыпучих материалов / С. И. Сухов // Горная промышленность. – 2017. – № 5 (135). – С. 42.
8. Попов, И. П. Исследование вынужденных колебаний механических систем. Часть 1 / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 4 (6). – С. 21–25.
9. Попов, И. П. Исследование вынужденных колебаний механических систем. Часть 2 / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 1 (7). – С. 27–32.
10. Попов, И. П. Определение динамических свойств сыпучего материала / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2021. – № 2 (12). – С. 23–27.

*I.P. Popov*  
*Kurgan State University*

## **SORTING MACHINE SIEVES TILT INFLUENCE ON PRODUCTION CAPACITY**

The article provides an example of calculating the productive capacity of a sorting machine depending on the tilt of the sieves. The calculation takes into account the friction of bulk material on the sieve which depends on the pressure on the surface. This pressure is determined by two forces: gravitational and inertial. Since the sieve acceleration is sign-variable, the pressure force changes with time. The  $k_v$ -part of the bulk material can conventionally be considered immovable relative to the sieve body and contribute to the inertial load, and the remaining  $(1 - k_v)$ -part can be considered movable and provide part of the dissipative load. It has been established that the angle of tilt of the sieves has practically no effect on the value of the average dissipative power but distorts the graphs of the friction force and power.

Sorting machine, sieves, tilt, dissipative power, friction, bulk material.



**Р.С. Саразов**  
 Московский авиационный институт  
 (национальный исследовательский университет)

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье рассматриваются вопросы создания автоматизированной системы управления для металлорежущего оборудования (вертикальный консольно-фрезерный станок, Heckert FS). Определены режимы работы, разработан комплект документации на шкаф системы управления, составлен алгоритм для примененного программируемого контроллера. Описываемый станок был полностью восстановлен и введен в эксплуатацию, а примененное решение в дальнейшем было адаптировано для возможности восстановления иных станков данного семейства.

Автоматизация процессов, алгоритмизация, математическая логика, система управления, программируемые контроллеры, промышленная автоматика, машиностроение, Heckert FS.

Металлообрабатывающее оборудование Heckert производилось на машиностроительном заводе «Fritz Heckert» в городе Карл-Маркс-Штадт (Хемниц), в ГДР. Восстанавливаемый экземпляр относится к вертикальным консольно-фрезерным станкам и называется Heckert FSS-400 (рис. 1).

Данная разновидность станков, в отличие от более массовых аналогов (6P12, 6P13 и др.), помимо прочих преимуществ, обладает ключевой важной особенностью: Heckert FSS-400 позволяет производить механическую обработку деталей в полуавтоматических циклах с минимальным участием оператора. По этой же причине создание системы управления для такого станка сильно отличается от «восстановления» обычного широкоуниверсального консольно-фрезерного.

К тому же описываемый экземпляр имел интересную историю: приблизительно в начале 1980-х

годов он был поставлен на предприятие, где простоял в заводской обрешетке нетронутым до середины 1990-х. С развалом СССР и разорением предприятия перешел в частные руки. Попытки расконсервации и ввода в эксплуатацию к успеху не привели, в связи с выявленными неполадками в стойке (системе) управления. После чего станок простоял без дела еще двадцать лет, пока в нем не возникла острая потребность. Таким образом, станок совсем не имел механического износа (выработки) и фактически был в состоянии «нового». Именно это стало главным аргументом при постановке вопроса о его восстановлении.

Иной момент, который требовал внимания, – это целесообразность ремонта и восстановления «родной» системы управления.



Рис. 1. Общий вид станка

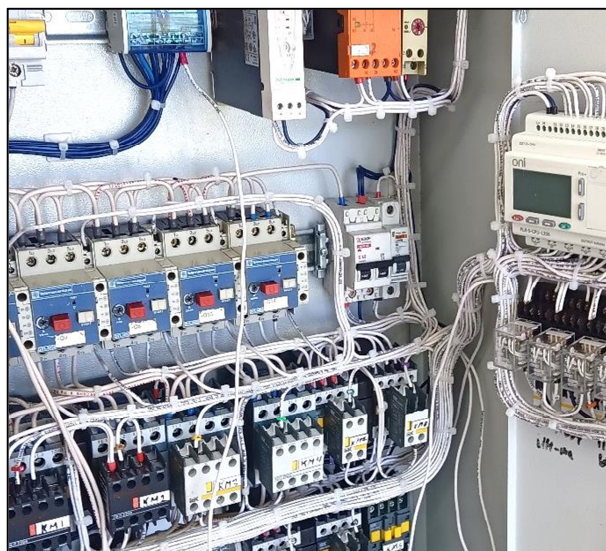


Рис. 2. Созданная СУ

Типовая проблема, с которой сталкиваются при восстановлении (проведении капитального ремонта) подобного технически сложного оборудования, – практически полное отсутствие документации на управляющую электронику: принципиальных электрических схем, спецификации и паспортов на используемую элементарную компонентную базу, структурированного и понятного описания алгоритма работы, схем и таблиц коммутации (подключения) всех проводников и клемм, таблиц логических функций.

Еще больше неприятностей связаны с самим внутренним устройством этой электроники – в ней применялись системы управления на основе первых программируемых логических контроллеров (ПЛК) конца 1970-х годов, собранных на примитивных логических интегральных схемах и дискретных элементах [1]. Такой контроллер представляет собой «корзину» (монтажную панель), в которую монтируются «платы» (модули), каждая из которых отвечает за ту или иную функцию. Эти устройства сложны в ремонте без вышеупомянутой документации либо наличия комплекта заведомо исправных плат (модулей). В особо тяжелых случаях (при выходе из строя центрального процессора контроллера или его модулей ПЗУ) ремонт становится невозможен: найти прошивку для ПЛИС (как и сами микросхемы ПЛИС, используемые в модуле ПЗУ) в настоящее время практически невозможно. Отсутствуют и данные о методе прошивки (обновлении микропроцессорной программы), документация и информация о программаторе [2].

Отсюда компонентный ремонт оригинальной системы управления не осуществим и/или не рационален в подавляющем большинстве случаев [3]. Такой вариант сразу был исключен из рассмотрения. Исходя из этого было принято решение восстанавливать си-

стему управления, разрабатывая ее полностью, с нуля (рис. 2). Следовательно, возникла необходимость детально разобраться во внутреннем устройстве и принципах работы станка. Отсутствие документации (кинематических схем, схемы расположения основных частей и узлов) снова осложнило процесс. Ниже, на рисунках 3 и 4, условно-схематично (с некоторыми допущениями) представлены основные узлы консольно-фрезерных станков семейства Heckert и их взаимное расположение.

Рабочий инструмент (фреза) приводится в движение приводом (1) через коробку передач (скоростей). Она имеет рукоять переключения с датчиком положения (3) и тормозное устройство (2), состоящее из системы электромагнитных муфт. Механизм фиксации инструмента (4) одинаков для всех типов данных станков, представляет собой дополнительный электромотор, вращение которого передается на заторможенный шпиндель через фрикционную муфту, приводимую электромагнитом, при помощи системы датчиков положения (подробнее далее).

Линейные перемещения (рис. 4) по осям X, Y, Z производятся при помощи стола, крестового суппорта и консоли соответственно. Автоматическое перемещение по координатам осуществляется одним электроприводом с помощью сложной системы электроэлектромагнитных муфт [4]: привод M2 через коробку скоростей (Y1 – «подача», Y2 – «ускоренная подача») передает вращение на три параллельных вала, а уже каждый из них механически связан с шаровинтовой передачей (ШВП) соответствующей оси. В свою очередь, каждый вал оси X, Y, Z имеет муфту, подключающую его к коробке скоростей (Y3, Y4, Y5) и тормозящую муфту, блокирующую вращение (Y7, Y8, Y9). Ось X содержит механизм компенсации люфта (гидравлический насос M3, который поджимает ведущую гайку вплотную к ШВП).

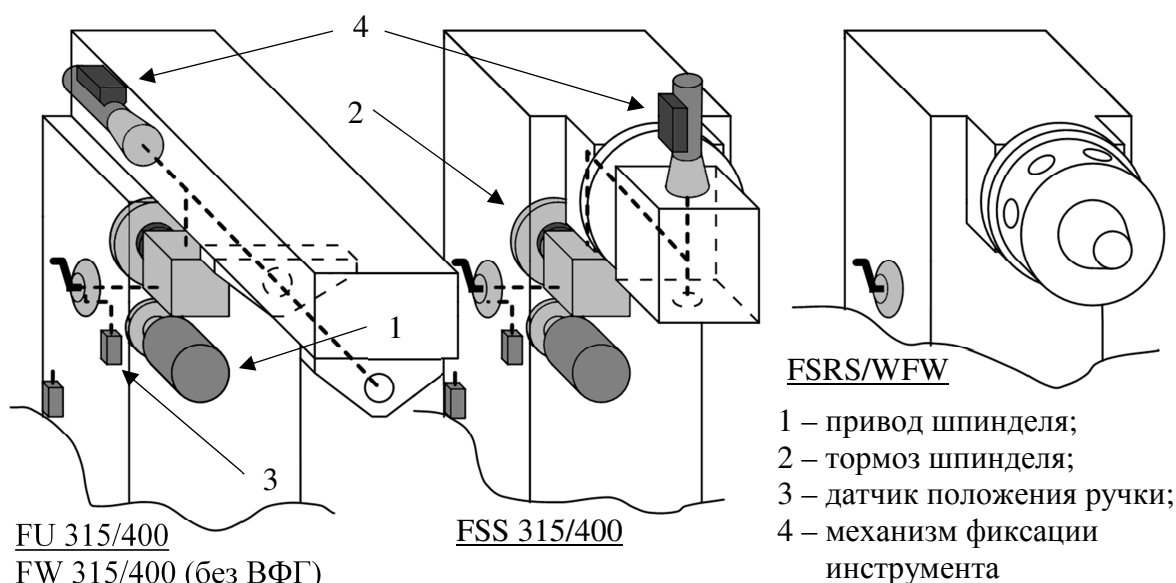


Рис. 3. Типы станков и их устройство

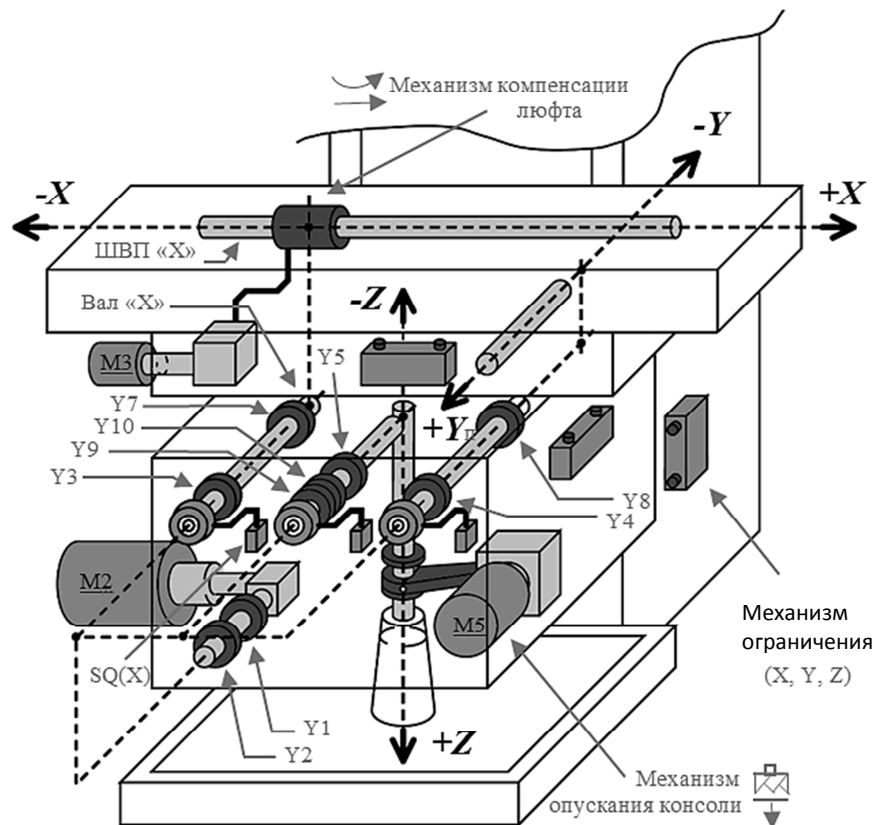


Рис. 4. Консоль

Таблица

### Режимы работы муфт

Y3 (Перемещение)	Y7 (Блокировка)	Функция	AND	OR	XOR
Отключено («0»)	Отключено («0»)	Ручной режим	0	0	0
Отключено («0»)	Включено («1»)	Блокировка оси	0	1	1
Включено («1»)	Отключено («0»)	Перемещение	0	1	1
Включено («1»)	Включено («1»)	НЕДОПУСТИМО	1	1	0

Ось Z имеет механизм опускания консоли (гидравлический насос M5, который с помощью специальной передачи припускает консоль на небольшое расстояние, для отвода инструмента в автоматических циклах обработки [5]), а также дополнительную муфту Y9, включающую режим замедленного перемещения. Каждая ось снабжена концевыми выключателями (ограничение максимального хода и подача команд для автоматических циклов). Имеется возможность ручного перемещения каждой оси с помощью специальной съемной рукоятки, которая при установке взаимодействует с датчиками (SQ(X), SQ(Y), SQ(Z)).

Бесперебойное и надежное функционирование станка определяется взаимосвязью и совместной работой всех вышеописанных элементов по определенному алгоритму. Его восстановление по образу и подобию исходного являлось самой сложной частью всей работы. Ошибки (к примеру, неправильная сработка тормоза и блокировки осей, шпинделя, ускоренного и замедленного перемещения) могли привести к серьезным поломкам оборудования. Для предотвращения таких ситуаций составлялись табли-

цы режимов работы, которые впоследствии сопоставлялись с таблицами истинности логических функций (табл.).

К примеру, электромагнитная муфта Y7 блокировки (тормоза) оси не должна (ни при каких условиях) включаться одновременно с муфтой Y3, отвечающей за подключение оси к коробке скоростей. Тогда как отключение обеих муфт позволяет перевести ось в ручной режим и осуществлять перемещение вращением съемной рукоятки.

В рассмотренном случае наиболее подходила таблица истинности функции «XOR» (исключающее «ИЛИ»). Получаемые части алгоритма удобнее всего записать в виде выражений на языке математической логики:

$$Y3 \text{ XOR } Y7 \Leftrightarrow Y3 \oplus Y7.$$

Направлением вращения привода M2 задается направление линейного перемещения («+» или «-», обозначено как «KM3» и «KM4»). Тогда автоматическое перемещение по осям происходит при следующих условиях:

$$X = Y3 \cdot \overline{Y7} \cdot \overline{SQ(X)} \cdot (Y1 \oplus Y2) \cdot (KM3 \oplus KM4),$$

$$Y = Y4 \cdot \overline{Y8} \cdot \overline{SQ(Y)} \cdot (Y1 \oplus Y2) \cdot (KM3 \oplus KM4),$$

$$Z = Y5 \cdot \overline{Y10} \cdot \overline{SQ(Z)} \cdot (Y1 \oplus Y2) \cdot (KM3 \oplus KM4).$$

(линия над элементом – инверсия, КМ – «контактор магнитный»)

Конструкцией станка предусмотрено одновременное перемещение только по одной оси с одной скоростью в одном направлении, две другие оси в этот момент времени должны быть заблокированы. К примеру, **ускоренное** перемещение в «+X» описывается выражением:

$$(Y3 \cdot \overline{Y7} \cdot \overline{SQ(X)} \cdot Y2 \cdot KM3) \cdot (Y8 \cdot Y10).$$

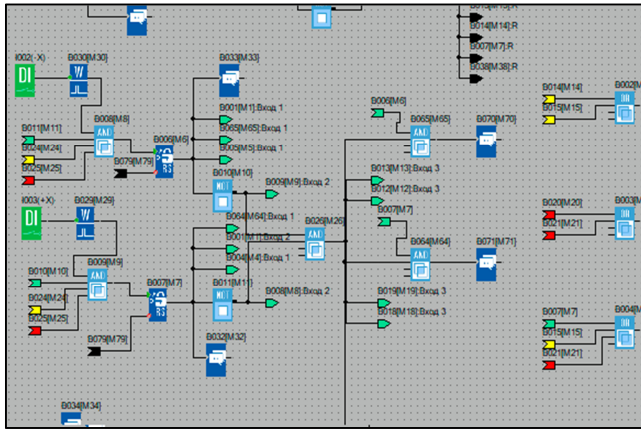


Рис. 5. Часть программы, отвечающая за условия выбора и включения перемещения по X

При перемещении по X в определенных режимах обработки детали возможно использование механизма компенсации люфта **M3**. Для этого нужно:  $(SA4.2 \oplus SA4.4) \cdot (Y3 \cdot \overline{Y7} \cdot (KM3 \oplus KM4)) \cdot Y1 \cdot \overline{Y2}$ .

(SA4.2 и SA4.4 – переключатель, отвечающий за выбор данного режима)

Используя законы алгебры логики, можно привести эти формулы к тому или иному виду [6–8]. Остается только определить, какие элементы данных функций доверить программе, а какие – реализовать аппаратно, с помощью электромеханики [9]. К примеру, на рисунках 5–6 показана реализация вышеупомянутого перемещения.

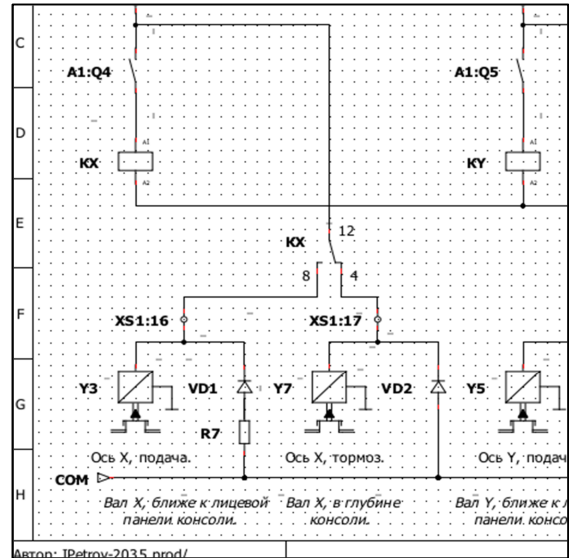


Рис. 6. Реализация выбора Y3 и Y7 с помощью логики электромеханических реле

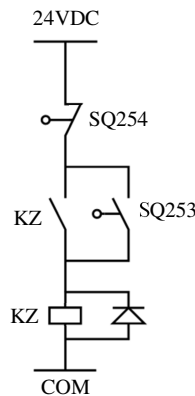
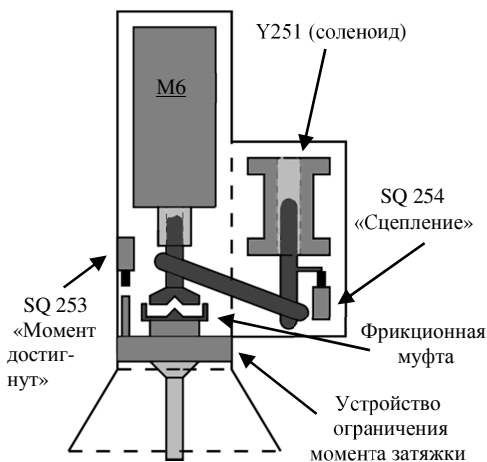


Рис. 7. Алгоритм работы механизма зажима инструмента (упрощенно) [10]

Натяжение:  $(Y251 \cdot \overline{SQ254} \cdot M6 \ll + \gg^1) \cdot Y6^2 \cdot \overline{KZ}^3;$

Инструмент зажат:  $(\overline{Y251} \cdot SQ254 \cdot \overline{M6}) \cdot KZ;$

Отпускание:  $(Y251 \cdot \overline{SQ254} \cdot M6 \ll - \gg) \cdot Y6 \cdot \overline{KZ};$

<sup>1</sup> M6«+», M6«-» направление вращения привода M6 (KM9  $\oplus$  KM10)

<sup>2</sup> Y6 =  $\overline{M1}$  – тормоз шпинделя (KM1  $\oplus$  KM2);

<sup>3</sup> KZ =  $\overline{SQ254} + (SQ253 \cdot KZ);$

\*SQ254 срабатывает с некоторой задержкой t

Таким образом, были воссозданы все исходные функции оригинальной системы управления: подачи по осям, вращение и остановка шпинделя, зажим/разжим инструмента, ручной режим и автоматические циклы. Получившийся полный алгоритм работы (рис. 7) достаточно сложен и содержит более 300 логических выражений. В конечной программе проработаны все «внештатные» ситуации, обеспечивающие его надежную и бесперебойную работу, особое внимание уделено функциям безопасности («защита от дурака», защита оборудования от ненормированных режимов работы). Наиболее «ответственные» части реализованы (либо дополнительно продублированы) аппаратно, с помощью электромеханики (релейная логика).

В качестве основы для системы управления выбран максимально простой по функционалу программируемый контроллер, поддерживающий модули расширения входов – выходов [11]. Вся система управления представляет собой небольшой электрический шкаф, габаритные размеры которого позволяют закрепить его сбоку станка. Однако по причине вышеописанных проблем с документацией интеграция новой системы управления со станком сопряжена с рядом сложностей и некоторыми трудозатратами (большой объем электромонтажных работ).

#### Литература

1. Электроавтоматика станков / О. П. Михайлов [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1974. – 184 с.
2. Numerik ps2000/1. – URL: <https://www.stanoks.net/forum/viewtopic.php?f=71&t=1863> (дата обращения: 10.08.2021). – Текст : электронный.
3. Ремонт стойки PS2000/1. – URL: <https://www.chipmaker.ru/topic/109493/?page=5> (дата обращения: 10.03.2021). – Текст : электронный.
4. ГОСТ 21573-76. Государственный стандарт СССР. Муфты электромагнитные многодисковые с магнитопроводящими дисками. Основные параметры и размеры : введен 1979-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 16 с.
5. Кучер, А. М. Металлорежущие станки. Альбом общих видов, кинематических схем и узлов / А. М. Кучер, М. М. Киватицкий, А. А. Покровский. – Москва : Машиностроение, 1972. – 307 с.
6. Яблонский, С. В. Функции алгебры логики и классы Поста / С. В. Яблонский, Г. П. Гаврилов, В. Б. Кудрявцев. – Москва : Наука, 1966. – 120 с.
7. Агарева, О. Ю. Математическая логика и теория алгоритмов / О. Ю. Агарева, Ю. В. Селиванов. – Москва : МАТИ, 2011. – 80 с.
8. Петров, И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / И. В. Петров. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.
9. Шальто, А. А. Логическое управление. Методы аппаратной и программой реализации алгоритмов / А. А. Шальто. – Санкт-Петербург : Наука, 2000. – 780 с.
10. Приводы зажима EDU – руководство по обслуживанию (отсканированный документ). – URL: <https://www.chipmaker.ru/files/file/10031/> (дата обращения: 15.08.2021). – Текст : электронный.
11. Шишов, О. В. Программируемые контроллеры в системах промышленной автоматизации / О. В. Шишов. – Москва : Инфра-М, 2016. – 365 с.

*R.S. Sarazov*

*Moscow Aviation Institute (National Research University)*

#### DEVELOPMENT OF AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR METALWORKING EQUIPMENT RESTORATION

The article discusses the issues of creating an automated control system for metal-cutting equipment (vertical cantilever milling machine, Heckert FS). The operating modes are determined, a set of documentation for the control system cabinet is developed, an algorithm for the applied programmable controller is compiled. The described machine was completely restored and put into operation, and the applied solution was later adapted for the possibility of restoring other machines of this family.

Process automation, algorithmization, mathematical logic, control system, programmable controllers, industrial automation, mechanical engineering, Heckert FSS.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА И АНАЛИЗ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА СО СВЯЗКОЙ ИЗ СПЕЦСТАЛИ

Представлены результаты экспериментальной оценки механических и технологических свойств твердых сплавов на основе 30, 40, 50, 60, 70, 80, 85 и 90 % карбида титана со стальной специальной связкой. Структура и состав спецстали созданы по модели, обеспечивающей стали высокую теплостойкость и улучшенное взаимодействие с карбидом титана. Образцы для испытаний изготовлены по традиционной технологии с жидкофазным спеканием. Установлены оптимальные температуры спекания сплавов, связанные с содержанием карбида титана и типом структуры сплава. Лучший комплекс свойств обеспечивает структура с мелкозернистым карбидным каркасом. Установлены закономерности изменения прочности при изгибе, твердости и износостойкости (износа абразивом) в зависимости от содержания карбида титана в сплаве. Фрактографический анализ подтвердил улучшенное взаимодействие стальной связки с карбидом титана при спекании, проявляющееся в повышенной прочности межфазовых границ. Уровень механических свойств позволяет рекомендовать сплавы для использования в качестве износостойких материалов.

Твердый сплав, карбид титана, стальная связка, структура, свойства, температура спекания, прочность, твердость, износ абразивом.

Попытки создания эффективных безвольфрамовых твердых сплавов со стальной связкой предпринимались почти сразу после открытия и патентования в 30-х годах XX века классических твердых сплавов на основе карбида вольфрама. Большое количество послевоенных публикаций по безвольфрамовым сплавам свидетельствует о значительном научном и практическом интересе к этой теме, прежде всего в связи с глобальным дефицитом вольфрама, а также некоторых других металлов (молибдена, тантала, ниобия, кобальта, никеля), пригодных для использования в твердых сплавах.

Все известные нам работы по исследованию твердых сплавов на основе карбида титана с железной и разными стальными связками показали: сплавы имеют высокую твердость (до HRA90), удовлетворительную износостойкость (особенно, при абразивном изнашивании), пониженную прочность при изгибе (500–1000 МПа), низкую теплостойкость. Режущие свойства оказались не упомянуты в публикациях. Из этого нами был сделан вывод о сложности проблемы, о необходимости последовательной многоэтапной методики исследования.

В наших работах исследовано взаимодействие всех пригодных твердых соединений при спекании с железной связкой [1], влияние этого взаимодействия на структуру и свойства сплавов [2–5], сделан выбор главного твердого соединения (карбида титана) и легирующих карбидов (ванадия, хрома и молибдена), влияние содержания карбида титана на структуру и свойства сплавов с железной связкой [6], влияние разных сталей (компонентов и структурного класса) на свойства сплавов [7], сделан выбор структурного

класса стали для связки (высоколегированный феррит + дисперсные интерметаллиды), влияние железомолибденовой связки (с указанной структурой) на структуру и свойства сплавов на основе карбида титана [8, 9].

Нами смоделирована структура и рассчитан состав специальной стали в системе (Fe – Cr – Mn – Ti) для использования в качестве связки в сплавах на основе карбида титана [10]. Спецсталь должна обеспечить улучшение взаимодействия связки и карбида титана и, главное, высокую теплостойкость сплава. Титан является сильным ферритообразователем, вместе с марганцем и хромом входит в состав упрочняющей интерметаллидной  $\chi$ -фазы и, кроме того, способен растворяться в карбиде титана (при его перекристаллизации через расплавленную связку путем обмена атомами), тем самым улучшая взаимодействие между стальной связкой и карбидом титана. Стабильная ферритная структура стали не разупрочняется (необратимо) при нагреве вплоть до температуры плавления.  $\chi$ -фаза не теряет когерентной связи с ферритной матрицей до температуры около 900 °С, что и определяет теплостойкость стали. Сталь в соответствии с отечественным стандартом получила обозначение Х14Г10Т6.

Порошковая сталь была изготовлена на Новотульском металлургическом комбинате распылением в аргоне. Химический анализ показал состав: 0,02 % С, 15,23 % Cr, 9,90 % Mn, 5,74 % Ti, 0,26 % Si, остальное – Fe. Кремний – примесные следы раскислителя, несколько завышенное (по сравнению с расчетным: 12–14 %) содержание хрома, заниженное (по расчету: 6–10 %) содержание титана. Состав полученной порош-

ковой стали можно считать приемлемым для экспериментальных твердых сплавов. Для исследования были выбраны составы экспериментальных сплавов, содержащих 30, 40, 50, 60, 70, 80, 85, 90 % карбида титана по массе, остальное – сталь X14Г10Т6. Образцы для экспериментальной оценки свойств были изготовлены в производственных лабораториях Димитровградского автоагрегатного завода и Московского ВНИИИнструмента. Использовалась технология: размол твердосплавных смесей в вибрационной мельнице в среде этилового спирта, пластифицирование 4-процентным раствором синтетического каучука в бензине, прессование при давлении 100 МПа, вакуумная сушка и спекание при нескольких температурах для каждого сплава. Для спекания использовались температуры из ряда: 1320, 1350, 1400, 1450, 1500, 1550, 1600, 1650, 1700, 1750 °С. Выдержка при спекании – 30 мин. Остаточное давление в камере при спекании  $1 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. При спекании с температурой выше 1600 °С остаточное давление увеличивалось до  $1 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст., что вызвано испарением стальной связки, конденсат которой обнаружен на стенках защитной молибденовой cassette и экранах камеры.

Экспериментально устанавливались технологические свойства: усадка при спекании, пористость, размер карбидного зерна, оптимальная температура спекания и важнейшие механические свойства: твердость на приборах Роквелла (шкала А) и Виккерса, предел прочности при изгибе (при трехточечном нагружении нешлифованных образцов), износ абразивом в установке нашей конструкции [5]. Для объяснения свойств использовался металлографический и фрактографический анализ со съемкой поверхностей на растровом электронном микроскопе «JSM-35». Свойства сплавов, спеченных при разных температурах, приведены в таблице.

Все свойства спеченных сплавов находятся в зависимости от главного режима спекания – температуры. Температура спекания, при которой достигнуто наилучшее сочетание механических свойств (рис. 1), принята как оптимальная для каждого сплава. Для сплавов TiC – сталь X14Г10Т6 оптимальная температура спекания зависит от содержания карбида титана (рис. 2).

Таблица

**Свойства сплавов TiC – сталь X14Г10Т6**

Содержание TiC в сплаве, % масс	Температура спекания, °С	Прочность при изгибе, МПа	Твердость HRA (HV)	Износ абразивом, мг	Пористость сплава, %	Размер карбидного зерна, мкм	Усадка при спекании, %
30	1350	910	76	-	-	-	15,2
	1400	1130	78	28	13	2	20,6
40	1350	840	78	-	-	-	16,9
	1400	1190	83	24	8	2	22,2
50	1400	1100	83,5	-	-	-	21,8
	1450*	1300	86(1200)	16,6	1,2	2,5	22,0
	1500	1270	86	17,5	1,5	3	22,7
	1550	1180	86	19	-	-	22,5
60	1450	970	86	17,6	2,5	2,5	23,3
	1500*	1080	87,5	12,0	1,5	3	24,2
	1550	920	88(1400)	12,8	-	-	23,8
	1600	860	86	-	-	-	23,3
70	1500	770	85	21,6	4	2,5	20,9
	1550	840	87	17,1	2,7	3,5	22,5
	1600*	880	89(1550)	10,0	1,5	5	23,6
	1650	790	89,5	13,3	2,2	7	24,2
	1700	710	89	14,5	2,8	10	22,7
80	1600	730	88	11,5	-	-	19,0
	1650*	780	89,5(1700)	7,7	3,1	7	21,8
	1700	620	86	18,4	-	-	22,8
85	1600	690	87	12,2	-	-	18,5
	1650*	760	90(1800)	6,4	2,2	7	22,2
	1700	730	88,5	-	-	-	22,8
90	1600	610	88,5	12	-	-	20,0
	1650*	730	90,5(1850)	5,9	2,8	7	22,0
	1700	550	90	-	-	-	22,0

Значком \* отмечены оптимальные температуры спекания сплавов.

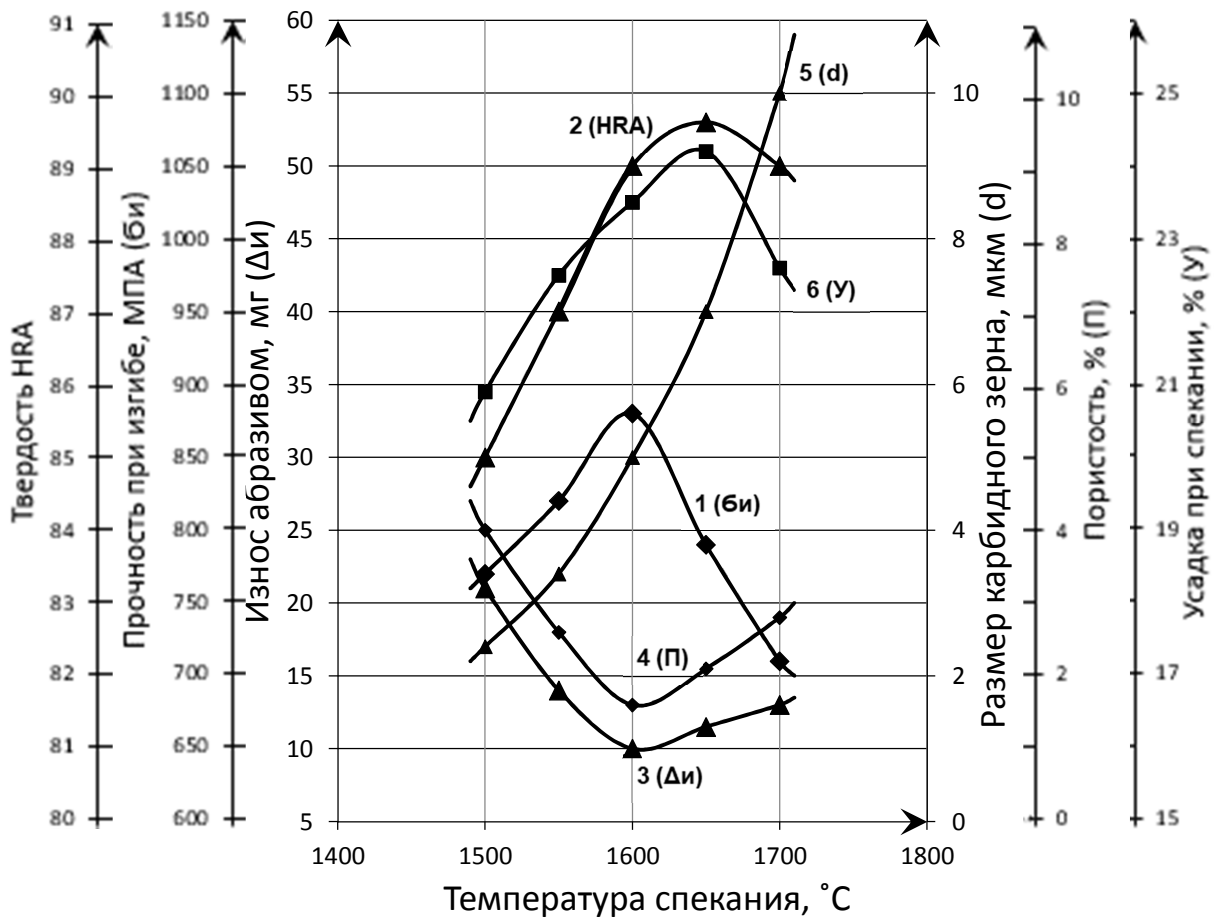


Рис. 1. Оптимальная температура спекания 1600 °C для сплава 70 % TiC – сталь X14Г10Т6 в сочетании свойств:  
 1 – прочность при изгибе; 2 – твердость; 3 – износ абразивом; 4 – пористость;  
 5 – средний размер карбидных зерен; 6 – усадка при спекании

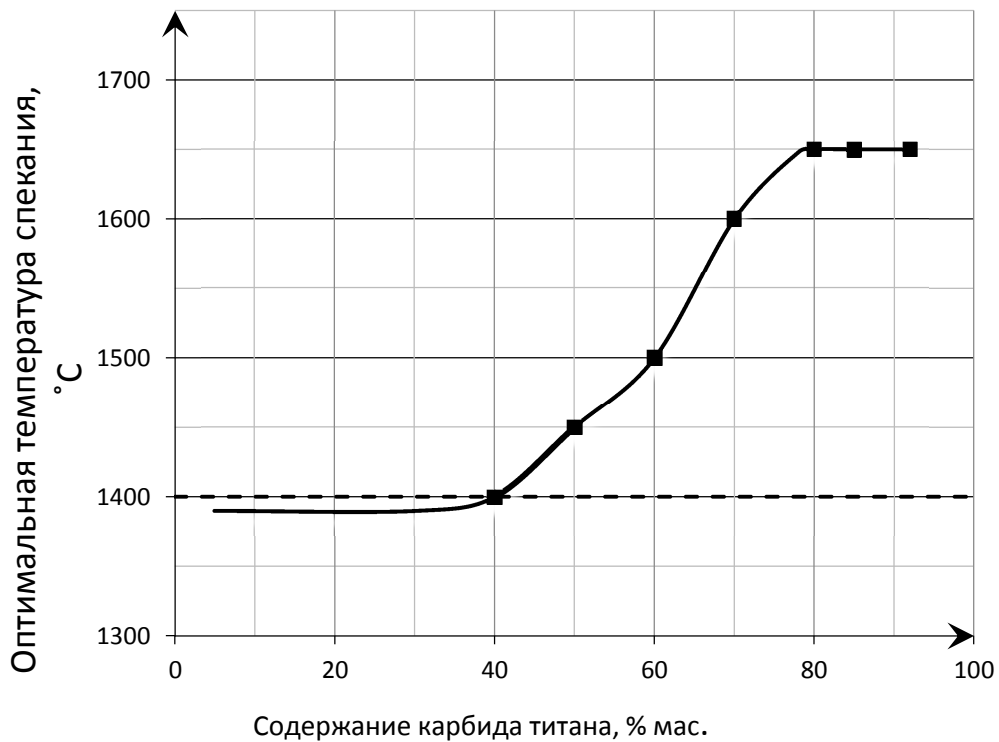


Рис. 2. Зависимость оптимальной температуры спекания от содержания карбида титана в сплавах TiC – сталь X14Г10Т6

При содержании TiC ниже 50 % оптимальная температура находится на уровне эвтектической в системе TiC – Fe, то есть около 1400 °С. Однако при этом обнаруживается оплавление образцов, то есть температура спекания должна быть ниже температуры появления большого количества жидкой фазы. Твердофазное спекание характерно для карбидосталей. В нашем случае, при спекании с температурой 1350 °С обнаруживается заметное снижение механических свойств сплавов, содержащих 30 и 40 % TiC, а при 1450 °С – полное оплавление образцов.

При содержании TiC от 50 до 70 % происходит монотонное увеличение оптимальной температуры спекания от 1450 °С (с небольшим перегревом относительно эвтектической) до 1650 °С. Перегрев требуется для усиления взаимодействия (растворимости и смачиваемости) карбида титана с железной связкой. В результате – снижается пористость и улучшаются механические свойства сплавов.

При содержании TiC от 80 до 90 % оптимальная температура спекания стабилизируется на уровне 1650 °С. Дальнейшее повышение температуры спекания приводит к испарению части связки и к росту зерен карбида титана из-за усиления его перекристаллизации через расплавленную связку. Это ухудшает механические свойства сплавов.

Можно предположить, что стабилизация оптимальной температуры спекания обусловлена образованием карбидного каркаса при содержании карбида титана в сплаве 80 % и более. Карбидный каркас (наблюдается при металлографическом анализе – рис. 3) состоит из сросшихся в местах контактов округлых (почти шаровидных) примерно одинаковой величины зерен карбида титана. Каркас образуется вследствие плотной упаковки зерен, когда связки хватает лишь для заполнения промежутков между зернами, а продолжающаяся перекристаллизация (растворение, перенос и повторная кристаллизация) карбидов приводит к росту поликристаллических округлых зерен (равномерно во всех направлениях) и контактных мостиков (сварки) между ними. Повышение темпера-

туры приводит к некоторому дополнительному растворению карбидов в связке и, в то же время, к испарению металлов (железа и марганца), поэтому объем жидкой фазы может даже уменьшиться и привести к образованию пор.

Механические свойства сплавов при оптимальных температурах спекания зависят от содержания карбида титана. Характер зависимостей имеет прямую связь со структурой сплавов.

Твердость с оценкой по линейной шкале Виккерса изменяется по зависимости, близкой к прямолинейной: от HV1200 при 50 % TiC до HV1850 при 90 % TiC, что объясняется гетерогенной структурой, близкой к эвтектической, и высокой микротвердостью карбида титана (HV3170). Экстраполяция этой прямой на начало координат (0 % TiC) дает расчетную микротвердость стальной связки HV400 (рис. 4), что примерно соответствует твердости стали X14Г10Т6 после закалки от 1150 °С и отпуска при 900 °С. Для сравнения приведены наши экспериментальные данные твердости сплавов на основе карбида титана с железной и железо-молибденовой связками [6, 8]. Твердость сплавов TiC – Fe ниже, линейный характер зависимости имеет при содержании TiC от 70 до 85 %. При большем содержании – твердость прекращает рост из-за резкого увеличения пористости сплава (связки недостаточно для заполнения промежутков между карбидными зернами). При содержании TiC 70 % и менее твердость сплавов ниже аддитивной зависимости вследствие того, что при отсутствии карбидного каркаса пластическая деформация развивается преимущественно по связке. У сплавов TiC – Mo – Fe твердость выше, чем у сплавов со спецсталью, благодаря уникальному влиянию молибдена на структуру связки (упрочнение без сильного охрупчивания) и ее взаимодействие с карбидом титана (растворимость молибдена в карбиде титана снижает до нуля краевой угол смачиваемости связкой карбидов при спекании, способствует образованию карбидного каркаса). Растворяясь в карбиде титана, фактически, молибден увеличивает содержание твердого соединения в сплаве.

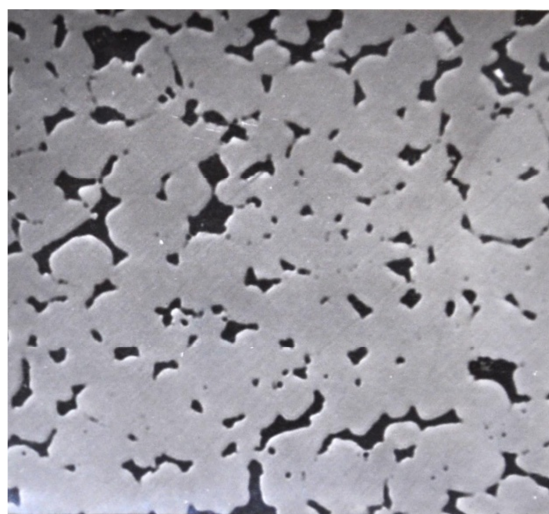
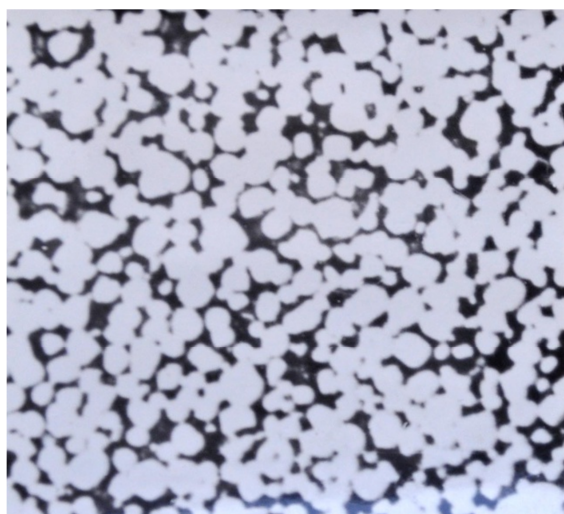


Рис. 3. Микроструктуры сплавов: а) 50 % TiC – сталь X14Г10Т6; б) 90 % TiC – сталь X14Г10Т6;  $\times 1000$

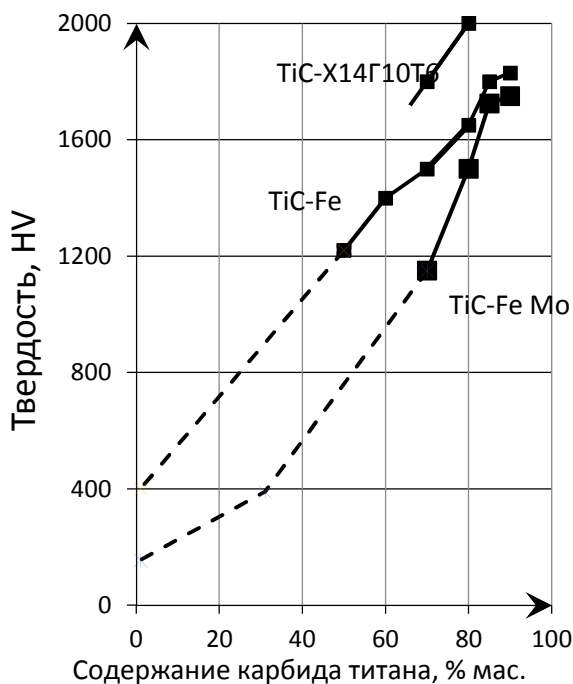


Рис. 4. Влияние содержания карбида титана на твердость сплавов со связками: 1 – сталь X14Г10Т6; 2 – железо [6]; 3 – железо-молибден (5 % Mo) [8]

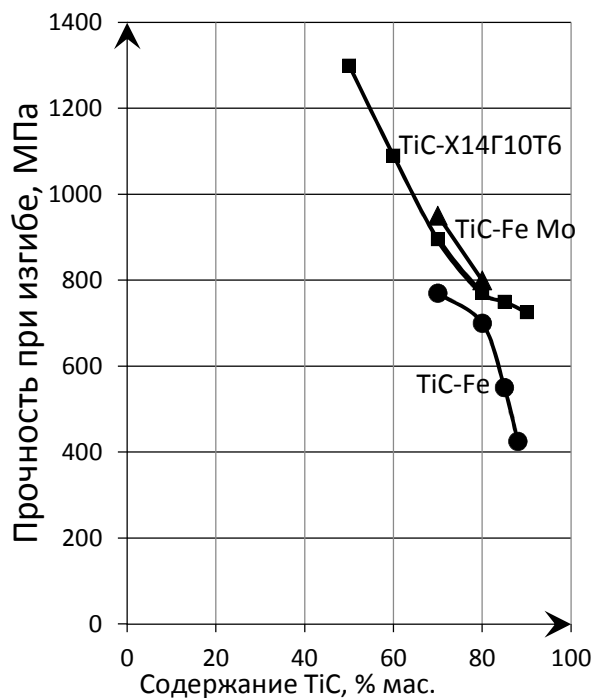


Рис. 5. Влияние содержания карбида титана на прочность при изгибе сплавов: 1 – TiC – сталь X14Г10Т6; 2 – TiC – Fe [6]; 3 – TiC – Mo – Fe [8]

Прочность при изгибе изменяется по обратной зависимости: с увеличением содержания карбида титана уменьшается от наибольшего значения 1300 МПа при 50 % TiC до наименьшего – 730 МПа при 90 % TiC. Характер зависимости объясняется меньшей прочностью карбида титана (1380 МПа при сжатии) по сравнению с прочностью при изгибе стали X14Г10Т6 (2500 МПа), а также увеличением площади ослабленных межфазовых границ. Прочность сплавов TiC – сталь X14Г10Т6 выше, чем у сплавов с железной связкой, но несколько ниже, чем у сплавов с железомолибденовой связкой на основе карбида титана (рис. 5). У сплавов с железной связкой характер зависимости отличается от сплавов со стальной связкой резким падением прочности при содержании карбида титана более 80 %. Это объясняется меньшим упрочнением железной связки (только за счет растворения титана при спекании), пониженной смачиваемостью, что при высоком содержании карбида титана приводит к значительной пористости. Молибден создает в связке структуру высоколегированного феррита с интерметаллидным упрочнением и улучшает взаимодействие связки с карбидом титана путем растворения в карбиде титана. Повышенная прочность сплавов TiC – Mo – Fe имеет также технологическое объяснение: порошкообразная связка Fe – Mo менее склонна к окислению, чем порошковая сталь X14Г10Т6, в итоге сплавы TiC – Fe – Mo имеют меньшую пористость.

Фрактографический анализ поверхностей разрушения при изгибе (рис. 6) позволяет объяснить экспериментальные данные. Микрорельефы изломов сплавов TiC – сталь X14Г10Т6 (рис. 6а) и TiC – Mo – Fe (рис. 6в) имеют большое сходство. Сплавы имеют

чисто хрупкий характер разрушения по карбидным зернам и с признаками большого сопротивления разрушению – по связке. Разрушающая трещина огибают отдельные карбидные зерна (несколько больше – у сплава TiC – сталь X14Г10Т6), что является признаком несколько меньшей прочности его межфазовых границ. Такое прохождение трещины говорит о том, что связка «заставляет» и менее прочную структурную составляющую (карбид титана) оказывать сопротивление разрушению. Хрупкое разрушение карбидных зерен очевидно при большом увеличении (рис. 6б): стекловидный излом с небольшой реччатостью. У сплава с железной связкой меньше прочность границ с карбидными зернами (рис. 6г), значительно больше зерен, обойденных трещиной, что снижает прочность сплава в целом.

Износ абразивом сплавов TiC – сталь X14Г10Т6 монотонно снижается при увеличении содержания карбида титана от 28 мг при 30 % TiC до 5,9 мг при 90 % TiC (рис. 7). Это однозначно объясняется его более высокой микротвердостью (то есть сопротивлением микропластической деформации), чем у связки сплава. Микротвердость карбида титана (HV3000-3170) сопоставима с микротвердостью абразива, в нашем случае – электрокорундового шлифпорошка (HV4000-5000). Микротвердость стальной и железомолибденовой связки HV400-550, железной связки HV100-200 (зависит от неравновесного содержания титана в феррите). Меньшая твердость связки и сплава в целом объясняет существенно больший износ сплавов TiC – Fe. Более высокая макротвердость сплавов TiC – Mo – Fe обеспечивает им меньший износ.

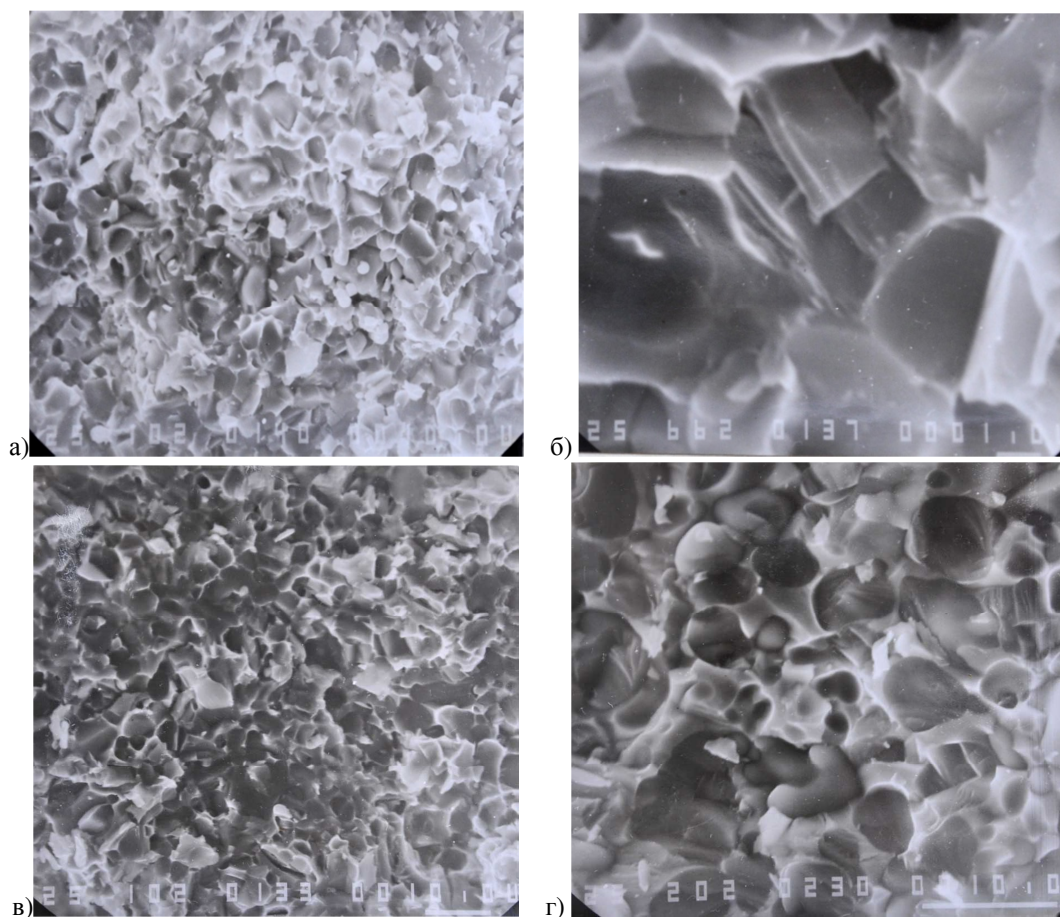


Рис. 6. Микрорельеф изломов сплавов: а) 70 % TiC – сталь X14Г10Т6,  $\times 1000$ ; б) 70 % TiC – сталь X14Г10Т6,  $\times 6600$ ; в) 70 % TiC, 5 % Mo, 25 % Fe,  $\times 1000$ ; г) 70 % TiC – Fe,  $\times 2000$

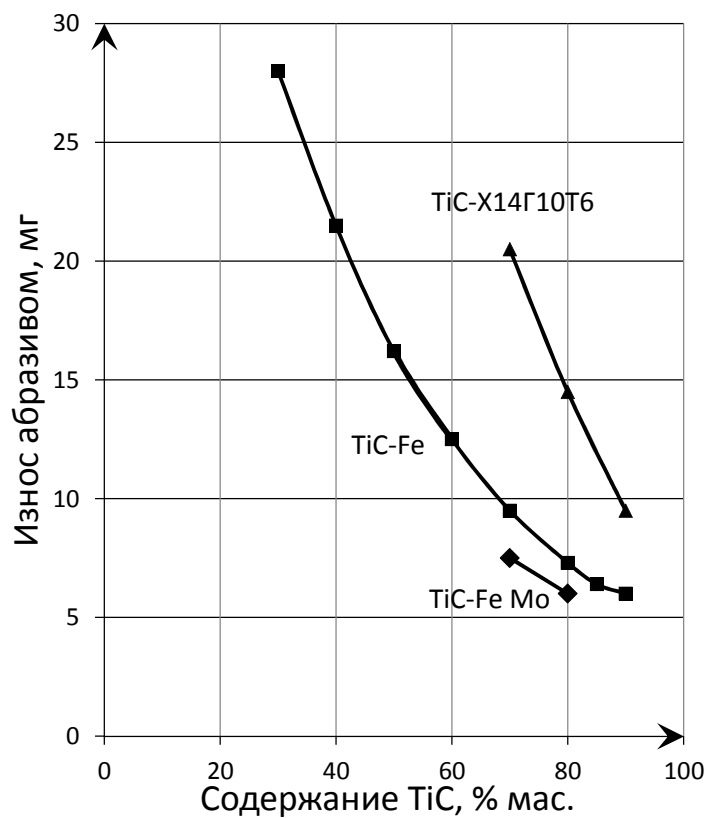


Рис. 7. Влияние содержания карбида титана на износ абразивом сплавов: 1 – TiC – сталь X14Г10Т6; 2 – TiC – Fe [6]; 3 – TiC – Mo – Fe [8]

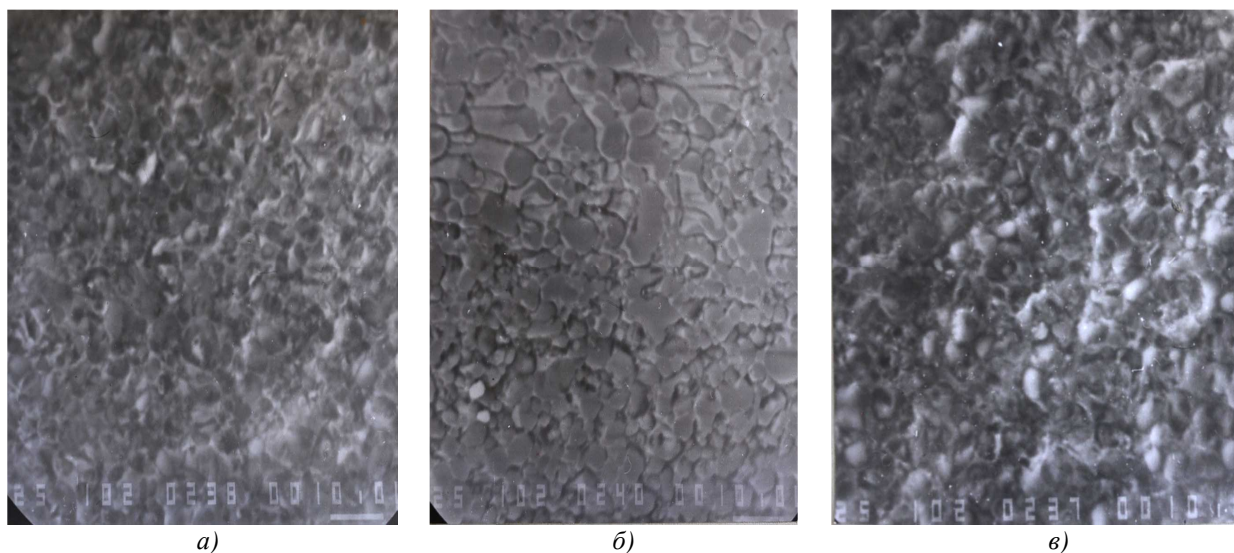


Рис. 8. Микрорельеф изношенных абразивом поверхностей сплавов:

а) 70 % TiC – сталь X14Г10Т6,  $\times 1000$ ; б) 70 % TiC, 5 % Mo, 25 % Fe,  $\times 1000$ ; в) 70 % TiC – Fe,  $\times 1000$ ; 70 % TiC – Fe,  $\times 2000$

Объяснение различия в износостойкости сплавов связано также со структурой сплава и с механизмом изнашивания. Большой размер абразивных частиц 40–50 мкм в сравнении с размером карбидных зерен (2–10 мкм) приводит к возникновению нескольких механизмов абразивного изнашивания: 1) истирание и микрорезание прослоек связки и обнажение более твердых зерен, 2) истирание выступающих карбидных зерен, 3) вырывание зерен из «гнезд» в связке, 4) пластическое течение сплава вследствие пластичности связки.

Вид и рельеф изношенных абразивом поверхностей (рис. 8) позволяет установить преимущественные механизмы изнашивания сплавов с разными связками и их влияние на интенсивность изнашивания. На поверхности сплава со связкой из стали X14Г10Т6 наблюдаются как изношенные (со стертými выступающими вершинами) карбидные зерна, так и места выкрашивания зерен (вследствие разрушения по связке) – механизмы 2, 3 (рис. 8а). У сплава с железо-молибденовой связкой наблюдается равномерный износ по вершинам карбидных зерен и более интенсивный износ (особенно в направлении прохождения абразивных зерен) – по менее твердой связке – механизмы 1, 2 (рис. 8б). При таком характере износа обеспечивается лучшее использование ресурса твердого износостойкого карбида титана. На изношенных поверхностях сплавов с железной связкой обнаруживаются борозды от прохождения абразивных зерен и места выкрашивания карбидных зерен (рис. 8в) – механизмы 3, 4. Изношенная поверхность имеет большое сходство с поверхностью разрушения (рис. 8г). Износ сплавов с железной связкой значительно больше (примерно в 2 раза), чем у сплавов со стальной связкой.

Уровень свойств твердых сплавов на основе карбида титана со связкой из спецстали X14Г10Т6 можно оценить путем сравнения со свойствами известных промышленных сплавов при идентичных технологиях изготовления и методиках оценки свойств. По данным ВНИИИнструмент: твердый сплав марки Т15К6 (79 % WC, 15 % TiC, 6 % Co) имеет твердость HRA90 и

предел прочности при изгибе 1250 МПа; безвольфрамовый твердый сплав марки ТН-20 (80 % TiC, 5 % Mo, 15 % Ni) – соответственно HRA91 и 950 МПа. Испытанные по нашей методике [5] образцы из этих сплавов показали: Т15К6 – износ 5,5 мг, ТН-20 – износ 5,0 мг.

При сопоставимых значениях твердости и износостойкости твердые сплавы 80–90 % TiC – сталь X14Г10Т6 уступают известным сплавам TiC – WC – Co по прочности. Это обстоятельство может быть ограничением при выборе условий работы сплавов, так как предполагает легкое безударное нагружение без динамических нагрузок и концентраторов напряжений, с преобладанием нормальных напряжений сжатия. Принципиально, что такие условия нагружения характерны для режущих элементов токарных и расточных инструментов, для матриц и пуансонов пресс-форм и некоторых штампов, износостойких футеровок, опорных и других износостойких деталей, которые составляют возможную область применения новых сплавов TiC – спецсталь.

Уровень свойств твердых сплавов TiC – спецсталь может быть повышен. Основные направления: оптимизация состава спецстали, оптимизация состава карбидной основы (перспективно легирование другими карбидами), совершенствование технологии изготовления сплавов (особенно для снижения пористости).

Установленные нами технологические свойства сплавов TiC – сталь X14Г10Т6 должны быть учтены в работах по улучшению структуры и свойств сплавов TiC – спецсталь. Представляется реальным повышение основных механических свойств (твердости, прочности и износостойкости) этих сплавов путем легирования карбидной основы.

Установленные оптимальные температуры спекания при высоком содержании в сплавах карбида титана требуют некоторого уточнения состава стальной связки. Для снижения оптимальной температуры спекания в состав сплавов могут быть введены компоненты с повышенной растворимостью в карбиде титана (как металлы, так и твердые соединения).

При оптимальной температуре минимальную величину имеет пористость – один из факторов влияния на механические свойства. Сплавы TiC – сталь X14Г10Т6 в нашей экспериментальной серии имеют пористость около 1,5 % (у сплавов типа Т15К6 – не более 0,2 %). Это – резерв повышения механических свойств.

Установлена величина линейной усадки при спекании, которая используется при расчете размеров прессовки и пресс-формы. Величина усадки у сплавов TiC – сталь X14Г10Т6 при содержании TiC 80–90 % составляет 21,8–22,2 %. Это значительно отличается от усадки сплавов группы ТК – от 25 до 32 %.

Установлено, что на величину зерен карбида титана влияет прежде всего температура спекания: от среднего размера зерна 2,5 мкм при 1450 °С до 10 мкм при 1700 °С. При оптимальных температурах 1600–1650 °С размер карбидного зерна составляет 5–7 мкм.

Одним из главных свойств связки твердого сплава, которое закладывалось при моделировании структуры спецстали, является высокая теплостойкость (выше, чем у связок Ni – Mo и Fe – Mo), поэтому главное ожидание связано с теплостойкостью и режущими свойствами сплавов TiC – сталь X14Г10Т6.

### Литература

1. Яняк, С. В. Экспериментальная оценка свойств твердых сплавов с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте : Материалы XIV Международной научно-технической конференции. – Вологда, 2018. – С. 281–284.

2. Яняк, С. В. Анализ структуры спеченных твердых сплавов с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Механика, оборудование, материалы и технологии : электронный сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции. – Краснодар, 2018. – С. 273–282.

3. Яняк, С. В. Анализ прочности твердых сплавов с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Междисциплинарные исследования, современное состояние и перспективы развития. Материалы XVI международной научно-практической конференции / «ИМПРУВ». – Екатеринбург, 2018. – С. 25–29.

4. Яняк, С. В. Анализ износостойкости твердых сплавов с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Междисциплинарные исследования, современное состояние и перспективы развития : материалы XVI международной научно-практической конференции / «ИМПРУВ». – Екатеринбург, 2018. – С. 30–37.

5. Комиссарова, И. И. Экспериментальная оценка и анализ износостойкости материалов / И. И. Комиссарова, С. В. Яняк, И. О. Берсенев // Вестник Вологодского государственного университета. – 2018. – № 2 (2). – С. 6–10.

6. Яняк, С. В. Влияние содержания карбида титана на свойства твердых сплавов с железной связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Актуальные проблемы науки и практики : материалы национальной научно-практической конференции. – Пенза, 2018. – С. 210–214.

7. Яняк, С. В. Экспериментальная оценка свойств твердых сплавов на основе карбида титана со стальными связками / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях народного хозяйства. Материалы национальной научно-практической конференции. Часть 4. Технические науки (Пенза, 28–29 марта 2018 г.) / Пензенский ГУАиС. – Пенза, 2018. – С. 204–209.

8. Яняк, С. В. Экспериментальная оценка свойств твердых сплавов на основе карбида титана с железомолибденовой связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Вестник Вологодского государственного университета. – 2018. – № 1 (1). – С. 23–27.

9. Яняк, С. В. Анализ структуры и свойств твердых сплавов на основе карбида титана с железомолибденовой связкой / С. В. Яняк, Г. Ю. Пивень // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 2 (4). – С. 22–26.

10. Яняк, С. В. Анализ свойств и структуры специальной стали для связки в твердых сплавах на основе карбида титана / С. В. Яняк, И. И. Комиссарова // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте : Материалы XV Международной научно-технической конференции. – Вологда : ВоГУ, 2021. – С. 47–52.

*S.V. Yaniak, I.I. Komissarova*  
*Vologda State University*

### EXPERIMENTAL EVALUATION AND ANALYSIS OF PROPERTIES OF HARD ALLOYS BASED ON SPECIAL STEEL BOND TITANIUM CARBIDE

The results of an experimental assessment of the mechanical and technological properties of solid alloys are based on 30, 40, 50, 60, 70, 80, 85, 85 and 90 % titanium carbide with a steel special connection. The structure and composition of special studies are created according to a model that provides steel high heat resistance and improved interaction with titanium carbide. Test samples are made according to traditional technology with liquid-phase sintering. Optimum sintering temperatures of alloys associated with the content of titanium carbide and the type of alloy structure were determined. The best complex of properties is provided by a structure with a fine-grained carbide frame. The patterns of changes in the strength of the bend, firmness and wear resistance (abrasive) are established, depending on the content of titanium carbide in the alloy. Fractiographic analysis confirmed the improved interaction of a steel ligament with a titanium carbide during sintering, manifested in the increased strength of interphase boundaries. The level of mechanical properties allows you to recommend alloys for use as wear-resistant materials.

Hard alloy, titanium carbide, steel ligament, structure, properties, sintering temperatures, strength, hardness, abrasive wear.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Баев Александр Сергеевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры судовых энергетических установок, систем и оборудования Санкт-Петербургского государственного морского технического университета (Санкт-Петербург, Россия)  
bas1949@yandex.ru

### **Белянина Анна Юрьевна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики и информатики Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
belianinaaiu@vogu35.ru

### **Бормосов Николай Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
bormosovna@vogu35.ru

### **Ботьков Андрей Олегович**

студент Института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
aiah@vogu35.ru

### **Булавин Вячеслав Федорович**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
bulavin35@mail.ru

### **Булавина Тамара Георгиевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
bulavinatg@vogu35.ru

### **Вельсовский Анатолий Юрьевич**

кандидат технических наук, заведующий кафедрой автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
vau@vogu35.ru

### **Востров Анатолий Валентинович**

старший преподаватель кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
aiah@vogu35.ru

### **Галочкин Вячеслав Александрович**

студент Института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
aiah@vogu35.ru

### **Губин Владимир Александрович**

студент Института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
aiah@vogu35.ru

### **Домаков Алексей Иванович**

кандидат технических наук, профессор кафедры управляющих и вычислительных систем Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
domakovai@yandex.ru

### **Комиссарова Ирина Игоревна**

кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
irigkom@mail.ru

**Кочкарева Татьяна Александровна**

кандидат технических наук, доцент кафедры математики и информатики Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)

tsk35@mail.ru

**Кривулина Эльвира Федоровна**

кандидат технических наук, доцент Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (Саратов, Россия)

orifelwi@mail.ru

**Круглов Владислав Владимирович**

магистрант кафедры автоматики и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)

kvmag20@yandex.ru

**Кузьмин Александр Григорьевич**

доктор медицинских наук, профессор кафедры управляющих и вычислительных систем Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)

bmt@vogu35.ru

**Огородов Леонид Иванович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидравлики и прочности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)

logorodov@mail.ru

**Полянский Андрей Михайлович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)

ampol@yandex.ru

**Попов Игорь Павлович**

старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов Курганского государственного университета (Курган, Россия)

ip.popow@yandex.ru

**Саразов Роман Сергеевич**

студент Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (Москва, Россия)

roman-03-31@mail.ru

**Синицын Антон Александрович**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплогазоснабжения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)

sinitsynaa@vogu35.ru

**Соболев Денис Алексеевич**

магистрант кафедры теплогазоснабжения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)

tgvs@vogu35.ru

**Соловьев Сергей Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)

solovvsa@vogu35.ru

**Соловьева Анастасия Андреевна**

аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)

solovevaaa@vogu35.ru

**Суконщиков Алексей Александрович**

кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой автоматики и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
avt@vogu35.ru

**Турыгин Сергей Викторович**

инженер кафедры управляющих и вычислительных систем Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
bmt@vogu35.ru

**Умаров Максуджон Файзулович**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры биомедицинской техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
umma54@rambler.ru

**Шапкина Вероника Андреевна**

кандидат педагогических наук, доцент кафедры автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
vtnk@bk.ru

**Шевцов Леонид Сергеевич**

обучающийся Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
sle6488@gmail.com

**Шляхов Станислав Михайлович**

доктор физико-математических наук, профессор Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. (Саратов, Россия)  
orifelwi@mail.ru

**Шорин Владимир Александрович**

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
ad@vogu35.ru

**Яняк Сергей Владимирович**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
tms@vogu35.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Baev Alexander Sergeevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Ship Power Installations, Systems and Equipment, St. Petersburg State Marine Technical University (St. Petersburg, Russia)  
bas1949@yandex.ru

### **Belyanina Anna Yurievna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics and Information Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)  
belianinaaiu@vogu35.ru

### **Bormosov Nikolai Alexandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automobiles and Automobile Economy, Vologda State University (Vologda, Russia)  
bormosovna@vogu35.ru

### **Botkov Andrey Olegovich**

Student of the Institute of Mechanical Engineering, Energy and Transport, Vologda State University (Vologda, Russia)  
aiah@vogu35.ru

### **Bulavin Vyacheslav Fedorovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)  
bulavin35@mail.ru

### **Bulavina Tamara Georgievna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)  
bulavinatg@vogu35.ru

### **Velovsky Anatoly Yurievich**

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Automobile Roads, Vologda State University (Vologda, Russia)  
vau@vogu35.ru

### **Vostrov Anatoly Valentinovich**

Senior Lecturer, Department of Automobiles and Automobile Economy, Vologda State University (Vologda, Russia)  
anatoly\_1@mail.ru

### **Galochkin Vyacheslav Alexandrovich**

Student of the Institute of Mechanical Engineering, Energy and Transport, Vologda State University (Vologda, Russia)  
aiah@vogu35.ru

### **Gubin Vladimir Alexandrovich**

Student of the Institute of Mechanical Engineering, Energy and Transport, Vologda State University (Vologda, Russia)  
aiah@vogu35.ru

### **Domakov Alexey Ivanovich**

Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Control and Computing Systems, Vologda State University (Vologda, Russia)  
domakovai@yandex.ru

### **Komissarova Irina Igorevna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Roads, Vologda State University (Vologda, Russia)  
irigkom@mail.ru

### **Kochkareva Tatyana Alexandrovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics and Information Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)  
tsk35@mail.ru

**Krivulina Elvira Fedorovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin (Saratov, Russia)  
orifelwi@mail.ru

**Kruglov Vladislav Vladimirovich**

Master student of the Department of Automation and Computer Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
kvmag20@yandex.ru

**Kuzmin Alexander Grigorievich**

Doctor of Medical Sciences, Professor of the Department of Control and Computing Systems, Vologda State University (Vologda, Russia)  
bmt@vogu35.ru

**Ogorodov Leonid Ivanovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Hydraulics and Strength, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg, Russia)  
l.ogorodov@mail.ru

**Poliansky Andrey Mikhailovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Computer Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
ampol@yandex.ru

**Popov Igor Pavlovich**

Senior Lecturer, Department of Mechanical Engineering Technology, Machine Tools and Tools, Kurgan State University (Kurgan, Russia)  
ip.popow@yandex.ru

**Sarazov Roman Sergeevich**

Student of Moscow Aviation Institute (National Research University) (Moscow, Russia)  
roman-03-31@mail.ru

**Sinitsyn Anton Alexandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Heat and Gas Supply, Vologda State University (Vologda, Russia)  
sinitsynaa@vogu35.ru

**Sobolev Denis Alekseevich**

Master student of the Department of Heat and Gas Supply, Vologda State University (Vologda, Russia)  
tgv@vogu35.ru

**Solovyov Sergey Alexandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
solovevsa@vogu35.ru

**Solovyova Anastasia Andreevna**

Postgraduate student of the Department of Industrial and Civil Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
solovevaaa@vogu35.ru

**Sukonshchikov Alexey Alexandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Automation and Computer Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
avt@vogu35.ru

**Turygin Sergey Viktorovich**

Engineer, Department of Control and Computing Systems, the Institute of Mathematics, Natural and Computer Sciences, Vologda State University (Vologda, Russia)  
bmt@vogu35.ru

**Umarov Maksujon Faizuloevich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Biomedical Engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)  
umma54@rambler.ru

**Shapkina Veronika Andreevna**

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Roads, Vologda State University (Vologda, Russia)  
vrnk@bk.ru

**Shevtsov Leonid Sergeevich**

Student of Civil Engineering Institute, Vologda State University (Vologda, Russia)  
sle6488@gmail.com

**Shlyakhov Stanislav Mikhailovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin (Saratov, Russia)  
orifelwi@mail.ru

**Shorin Vladimir Alexandrovich**

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automobile Roads, Vologda State University (Vologda, Russia)  
ad@vogu35.ru

**Yaniak Sergey Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)  
tms@vogu35.ru

*Научное издание*

ВЕСТНИК ВОЛОГОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Технические науки  
№ 2 (16) / 2022

Главный редактор А. А. Кочкин

Свидетельство о регистрации СМИ: ПИ № ФС77-75456 от 05.04.2019 г.  
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций  
(Роскомнадзор)

Подписано в печать 13.09.2022. Выпуск в свет 30.09.2022. Формат 60 × 84/8  
Уч.-изд. л. 10,12. Усл. печ. л. 11,0. Тираж 30 экз. Заказ № 649. Цена свободная

---

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет»  
160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15

Отпечатано: ООО РА «Эпатаж»  
160004, г. Вологда, ул. Ленинградская, 38  
Тел.: (8172) 724-800, 70-25-77, e-mail: ra-epatazh@mail.ru