

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«Тверской государственный технический университет»**  
(ТвГТУ)

**ВЕСТНИК**  
**ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО**  
**ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Технические науки»**

**Научный рецензируемый журнал**  
**№ 1 (25), 2025**

**Online ISSN 2687-0029**

Тверь 2025

**Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»**

**Главный редактор:** Болотов А.Н., д.т.н., профессор ТвГТУ

**Заместители главного редактора:**

Измайлов В.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Яблонев А.Л., д.т.н., профессор ТвГТУ

Семенов Н.А., д.т.н., профессор ТвГТУ

**Ответственный секретарь:** Афанасьева Л.Е., к. ф.-м. н., доцент ТвГТУ

**Члены редакционной коллегии:**

*По направлению «Машиностроение»*

Гершман И.С., д.т.н., профессор ВНИИЖТ

Горячева И.Г., академик РАН, д.ф.-м.н., профессор ИПМех РАН

Иванов А.С., д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана

Козырева Л.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Матлин М.М., д.т.н., профессор ВолгГТУ

Мигранов М.Ш., д.т.н., профессор МГТУ «СТАНКИН»

Солдатенков И.А., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник ИПМех РАН

Хопин П.Н., д.т.н., профессор МАИ

*По направлению «Недропользование и горные науки»*

Березовский Н.И., д.т.н., профессор БНТУ, Республика Беларусь

Валиев Н.Г., д.т.н., профессор УГГУ

Горлов И.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

Керопян А.М., д.т.н., доцент, главный научный сотрудник ООО «МНИПИИТИ»

Кондратьев А.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Мисников О.С., д.т.н., доцент ТвГТУ

Рахутин М.Г., д.т.н., доцент НИТУ «МИСиС»

*По направлению «Информационные технологии и телекоммуникации»*

Бурдо Г.Б., д.т.н., профессор ТвГТУ

Голенков В.В., д.т.н., профессор БГУИР, Республика Беларусь

Дзюба С.М., д.физ.-мат. наук, профессор ТвГТУ

Мешалкин В.П., академик РАН, д.т.н. РХТУ им. Д.И. Менделеева

Палюх Б.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Шпрехер Д.М., д.т.н., профессор ТулГУ

Язенин А.В., д.ф.-м.н., профессор ТвГУ

Адрес редакции: 170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, д. 22.

E-mail: [vestnik\\_tstu\\_tekh@mail.ru](mailto:vestnik_tstu_tekh@mail.ru)

Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки» публикует научные статьи и краткие обзоры по разделам «Машиностроение», «Недропользование и горные науки», «Информационные технологии и телекоммуникации». Журнал выходит четыре раза в год.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: ЭЛ № ФС77-74961 от 25 января 2019 года. Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, по научным специальностям:

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации;

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;

2.5.3. Трение и износ в машинах;

2.8.8. Геотехнология, горные машины.

© ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Головнин А.А.</i> Синтез зубчатой передачи с изменяемым углом между осями колес.....	5
<i>Архаров А.П.</i> Установка вала с конической поверхностью на центрах станка.....	12
<i>Ганчев Н.М., Сахаров К.А., Афанасьева Л.Е.</i> Металлографический анализ конструкционной стали после закалки многоканальным лазером.....	17
<i>Смолякова И.А., Иванова А.И., Афанасьева Л.Е.</i> Структурообразование чугунных отливок стеклоформ.....	24

### НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

<i>Яблонев А.Л.</i> Теоретическое обоснование рациональных параметров торфяного куска трубчатой формы.....	32
<i>Лобачева Л.В.</i> Обоснование технологии комплексного освоения техногенных месторождений бурого угля.....	39
<i>Хамидов М.Б.</i> Влияние продолжительности эксплуатации на количество отказов буровых станков СБШ-250.....	47

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

<i>Бухольцев И.М., Рындин Н.А.</i> Оптимизационное моделирование при управлении ребалансировкой инвестиционного процесса развития многообъектной организационной системы.....	55
<i>Казаков Г.В.</i> Применение искусственного интеллекта в жизненном цикле автоматизированной системы подготовки данных управления летательными аппаратами.....	65
<i>Бобков В.И., Быков А.А., Орехов В.А., Незамаев С.В.</i> Программная реализация математической модели расчета времени дозирования рудного сырья в дозирочно-смесительном комплексе агломерационной фабрики.....	77
<i>Чичановская Л.В., Бахарева О.Н.</i> Перспективы применения цифровых медицинских технологий в Тверском государственном медицинском университете.....	87

### ХРОНИКА

#### МАТЕРИАЛЫ НАУЧНОГО СЕМИНАРА «ЗОЛОТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ»

<i>Байбаков А.И., Кочетыгов М.Ю.</i> Возможности Центрального научно-исследовательского института Воздушно-космических сил Минобороны России по организации научных исследований для молодых ученых и специалистов.....	93
<i>Шестакова В.Г., Буглак А.О., Козловская Ю.В., Павлов Р.Д.</i> Особенности регенерации кожных ран различной этиологии.....	102

## CONTENTS

### MECHANICAL ENGINEERING

<i>Golovnin A.A.</i> Synthesis of a gear train with a variable angle between the axles of the wheels.....	5
<i>Arkharov A.P.</i> Shaft with a tapered surface installation on the centers of the machine.....	12
<i>Ganchev N.M., Sakharov K.A., Afanasieva L.E.</i> Metallographic analysis of structural steel after hardening with multichannel laser.....	17
<i>Smolyakova I.A., Ivanova A.I., Afanasieva L.E.</i> Structure formation of cast iron glass mold castings.....	24

### SUBSOIL USE AND MINING SCIENCES

<i>Yablonev A.L.</i> Theoretical justification of rational parameters of a tubular sod peat.....	32
<i>Lobacheva L.V.</i> Justification of technology for integrated development of technogenic brown coal deposits.....	39
<i>Khamidov M.B.</i> Influence of operation duration on the number of failures of failures of drilling rigs SBSH-250.....	47

### INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

<i>Bukholtsev I.M., Ryndin N.A.</i> Optimization modeling at management of rebalancing of investment process of development of multi-object organizational system.....	55
<i>Kazakov G.V.</i> Application of artificial intelligence in life cycle of automated aircraft control data preparation system.....	65
<i>Bobkov V.I., Bykov A.A., Orekhov V.A., Nezamaev S.V.</i> Software implementation of a mathematical model for calculating the dosing time of ore raw materials in the dosing and mixing complex of an agglomeration factory.....	77
<i>Chichanovskaya L.V., Bakhareva O.N.</i> Prospects for the use of digital medical technologies in Tver State Medical University.....	87

### NEWS, EVENTS, MEMORIES

#### MATERIALS OF THE SCIENTIFIC SEMINAR «ZOLOTOV READINGS»

<i>Baibakov A.I., Kochetygov M.Yu.</i> Capabilities of the Central research institute of the Russian ministry of defense on the organization of scientific research for young scientists and specialists.....	93
<i>Shestakova V.G., Buglak A.O., Kozlovskaya Yu.V., Pavlov R.D.</i> Features of regeneration of skin wounds of various etiologies.....	102

# МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.833.6

## СИНТЕЗ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ С ИЗМЕНЯЕМЫМ УГЛОМ МЕЖДУ ОСЯМИ КОЛЕС

А.А. ГОЛОВНИН, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: golovninaa@rambler.ru

© Головнин А.А., 2025

Статья посвящена синтезу зубчатой передачи с возможностью изменения угла между осями колес. Приведено решение для передачи, одно из зубчатых колес которой коническое, а второе – тороидное с материализованной внутренней областью тора. Для этого опора для вращательного движения тороидного зубчатого колеса должна быть размещена на охватывающем его коленчатом валу, коренные шейки которого смонтированы на ползунах с неподвижными направляющими, параллельными касательной к делительному конусу конического зубчатого колеса. Коленчатый вал снабжен синусным механизмом, содержащим смонтированный на щеке коленчатого вала кривошип, соединенный с ползуном, неподвижная направляющая которого расположена перпендикулярно неподвижным направляющим опор коренных шеек коленчатого вала.

*Ключевые слова:* зубчатые передачи, тороидное колесо, поворот осей колес.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-5-11**

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из сторон научно-технического прогресса является ускоренное развитие робототехники, в том числе совершенствование и расширение возможностей приводов. В частности, проводятся научные изыскания в области приводов с изменяющимися углами между осями вращающихся валов. Высшие пары, к которым относятся зубчатые передачи, могут иметь линейное или точечное касание поверхностей звеньев. Линейное касание позволяет обеспечить более высокие прочностные свойства, точечное же дает большую степень свободы. Линейное касание реализовано в зубчатых передачах, делительные поверхности которых представляют собой линейчатые поверхности вращения: в виде прямых круговых цилиндра и конуса, в том числе их предельных вариантов – реечного зацепления и вращения с участием плоского диска, а также однополостного гиперболоида вращения [1]. Точечное касание возможно с участием в качестве делительной поверхности вращения, образованной вращением кривых линий. Представляет интерес рассмотрение поверхностей второго порядка, к которым относятся тор [2] и его частные случаи: сфера [3], эллипсоид, параболоид и двуполостной гиперболоид; они могут соприкоснуться в одной точке, вокруг которой возможен взаимный поворот осей таких колес. Рассматривается устройство и обосновываются параметры зубчатой передачи, одно из колес которой коническое, а второе – тороидное и сопряжение колес сохраняется в процессе взаимного поворота их осей [4].

## МЕТОД РЕШЕНИЯ

Приведен синтез варианта зубчатой передачи с возможностью изменения угла между осями колес, выбрана схема зубчатой передачи с точечным касанием делительных поверхностей, одно из колес которой коническое, а второе – тороидное. На основании анализа геометрических соотношений найдено условие сохранения сопряжения колес в процессе взаимного поворота их осей, предложена схема механизма поворота осей колес относительно друг друга. Определены параметры этой схемы, обеспечивающие выполнение требуемого движения.

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОПРЯЖЕНИЯ КОЛЕС В ПРОЦЕССЕ ПОВОРОТА ИХ ОСЕЙ

Зубчатая передача (рис. 1) содержит сопряженные коническое 1 и тороидное 2 зубчатые колеса. У тороидного зубчатого колеса, в отличие от глобоидных червяков, материализована внутренняя область тора. Сопряжение конического и тороидного зубчатых колес возможно, если в процессе обкатки тороидного колеса по коническому будет обеспечиваться равенство их расчетных модулей в полюсе зацепления:  $m_x = m_\varphi$ , где  $m_x = \frac{D_x}{z_1}$  и  $m_\varphi = \frac{D_\varphi}{z_2}$ , т.е. число зубьев  $z_1$  и  $z_2$  и диаметры делительных окружностей  $D_x$  конической и  $D_\varphi$  тороидной делительных поверхностей в полюсе зацепления должны находиться в одной и той же пропорции:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{D_x}{D_\varphi}.$$

При этом модули  $m_x = m_\varphi$  по ширине зубчатого венца конического зубчатого колеса и по дуге зубчатого венца тороидного зубчатого колеса должны изменяться в одном и том же диапазоне, от минимального внутреннего  $m_{ni}$  до максимального внешнего  $m_{ne}$ . Поскольку тороидное колесо может быть сопряжено с коническим только внешней частью 3 своей поверхности, причем только по одну сторону от продольной плоскости симметрии, его рабочая часть ограничивается 1/4 частью поверхности тора в пределах  $90^\circ$  от его наибольшего диаметра.

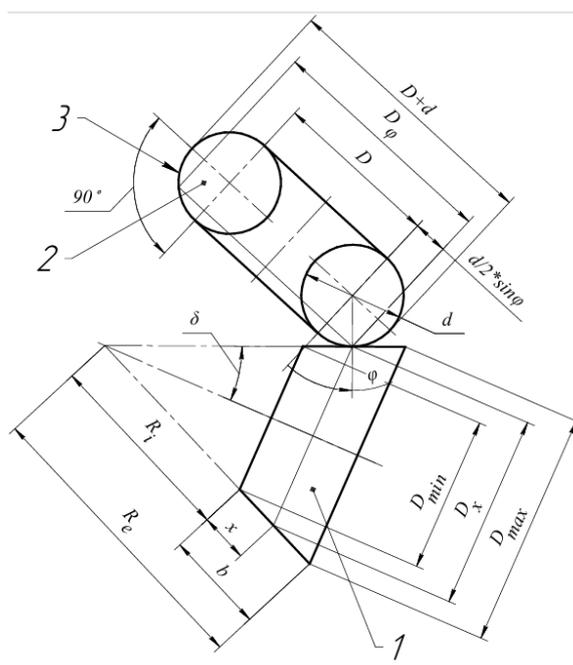


Рис. 1. Расчетная схема сопряжения конического и тороидного зубчатых колес

Делительный диаметр конического зубчатого колеса вдоль ширины его зубчатого венца линейно изменяется по ширине его зубчатого венца  $b$ :

$$D_x = 2(R_i + x) \operatorname{tg} \delta,$$

где  $R_i$  – внутреннее делительное конусное расстояние конического зубчатого колеса;  $x$  – расстояние от края зубчатого венца со стороны вершины делительного конуса;  $\delta$  – угол делительного конуса конического зубчатого колеса.

Диапазон изменения делительного диаметра конического зубчатого колеса от минимального внутреннего  $D_i = 2R_i \operatorname{tg} \delta$  при  $x = 0$  до максимального внешнего  $D_e = 2R_e \operatorname{tg} \delta$  при  $x = b$ , где  $R_e = R_i + b$  – внешнее делительное конусное расстояние конического зубчатого колеса.

Соответственно и его расчетный модуль изменяется по ширине зубчатого венца  $b$  от минимального внутреннего  $m_{ni}$  на внутреннем делительном конусном расстоянии  $R_i$  до максимального внешнего  $m_{ne}$  на внешнем делительном конусном расстоянии  $R_e$ :

$$m_x = \frac{2(R_i + x) \operatorname{tg} \delta}{z_1}, \quad 0 \leq x \leq b,$$

Диаметр делительной окружности на делительной поверхности тороидного зубчатого колеса по длине дуги рабочего участка его зубчатого венца определяется формулой

$$D_\varphi = D + d \cdot \sin \varphi, \quad 0 \leq \varphi \leq 90^\circ.$$

В диапазоне  $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$  диаметр делительной окружности изменяется от минимального  $D_{\varphi i} = D$  при  $\varphi = 0^\circ$  до максимального  $D_{\varphi e} = D + d$  при  $\varphi = 90^\circ$ .

Расчетный модуль тороидного зубчатого колеса

$$m_\varphi = \frac{(D + d \cdot \sin \varphi)}{z_2}$$

изменяется в тех же пределах, что и у конического колеса, от минимального внутреннего  $m_{ni}$  при  $\varphi = 0$  до максимального внешнего  $m_{ne}$  при  $\varphi = 90^\circ$ , но по синусоидальной зависимости. Анализ уравнения показывает, что при  $D = 0$  (что соответствует частному случаю тора – сфере) диапазон изменения  $m_\varphi$  больше по сравнению с тором. Это не рационально, так как с уменьшением модуля уменьшается прочность зубьев на изгиб. По данной причине диаметр тора  $D$  не должен быть малым по сравнению с диаметром трубы тора  $d$ .

Равенство модулей в полюсе зацепления определяет соотношение между геометрическими параметрами конической и тороидной делительными поверхностями соответственно конического и тороидного колес в виде

$$\frac{2 \operatorname{tg} \delta (R_i + x)}{z_1} = \frac{(D + d \cdot \sin \varphi)}{z_2},$$

т.е. при равномерном повороте тороидного колеса смещение полюса зацепления должно происходить по синусоидальному закону, что может быть обеспечено включением в механизм поворота тороидного колеса синусного механизма.

Для выполнения условия равенства минимальных расчетных модулей при минимальных делительных диаметрах должно выполняться равенство

$$\frac{2R_i \operatorname{tg} \delta}{z_1} = \frac{D}{z_2},$$

или диаметр тора делительной поверхности тороидного зубчатого колеса должен быть равен

$$D = \frac{z_2}{z_1} \cdot 2R_i \operatorname{tg} \delta.$$

Для выполнения условия равенства максимальных расчетных модулей при максимальных делительных диаметрах должно выполняться равенство

$$\frac{2 \cdot (R_i + b) \cdot \operatorname{tg} \delta}{z_1} = \frac{(D + d)}{z_2}$$

С учетом того, что  $\frac{2R_i \operatorname{tg} \delta}{z_1} = \frac{D}{z_2}$ , для диаметра трубы тора имеем

$$d = \frac{z_2}{z_1} \cdot 2b \operatorname{tg} \delta.$$

В частном случае, при равенстве чисел зубьев  $z_1 = z_2$ ,  $D = 2R_i \operatorname{tg} \delta$ ,  $d = 2b \operatorname{tg} \delta$ , передаточное число  $u = 1$  и такая передача функционально аналогична шарниру равных угловых скоростей, но позволяет взаимное отклонение осей на  $90^\circ$ .

Поверхность выступов тороидного зубчатого колеса в каждом осевом сечении должна отстоять от делительной поверхности на принятую для зубчатых колес эвольвентного профиля величину, равную величине модуля в данной точке  $h_a = m_\varphi$ , или

$$h_a = \frac{(D + d \cdot \sin \varphi)}{D} m_{ni}.$$

Соответственно поверхность впадин тороидного зубчатого колеса в каждом осевом сечении должна отстоять вовнутрь от делительной поверхности на принятую для зубчатых колес эвольвентного профиля величину  $h_f = 1,25 \cdot m_\varphi$ , или

$$h_f = 1,25 \frac{(R + r \cdot \sin \varphi)}{R} m_{ni}.$$

Обе поверхности можно рассматривать как образованные участками соответствующих спиралей Архимеда вида

$$\rho = \frac{a}{2\pi} \varphi,$$

где  $a$  – шаг спирали.

### ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМА ПОВОРОТА ОСЕЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Зубчатая передача (рис. 2) содержит сопряженные коническое 1 и торoidalное 2 зубчатые колеса. У торoidalного зубчатого колеса, в отличие от глобоидных червяков, материализована внутренняя область тора. Для возможности взаимного поворота осей зубчатых колес опора 4 для вращательного движения конического зубчатого колеса выполнена неподвижной, а опора 5 для вращательного движения торoidalного зубчатого колеса размещена на охватывающем его коленчатом валу 6. Коренные шейки 7 коленчатого вала смонтированы на ползунах 8, неподвижные направляющие 9 которых параллельны касательной 10 к делительному конусу конического зубчатого колеса.

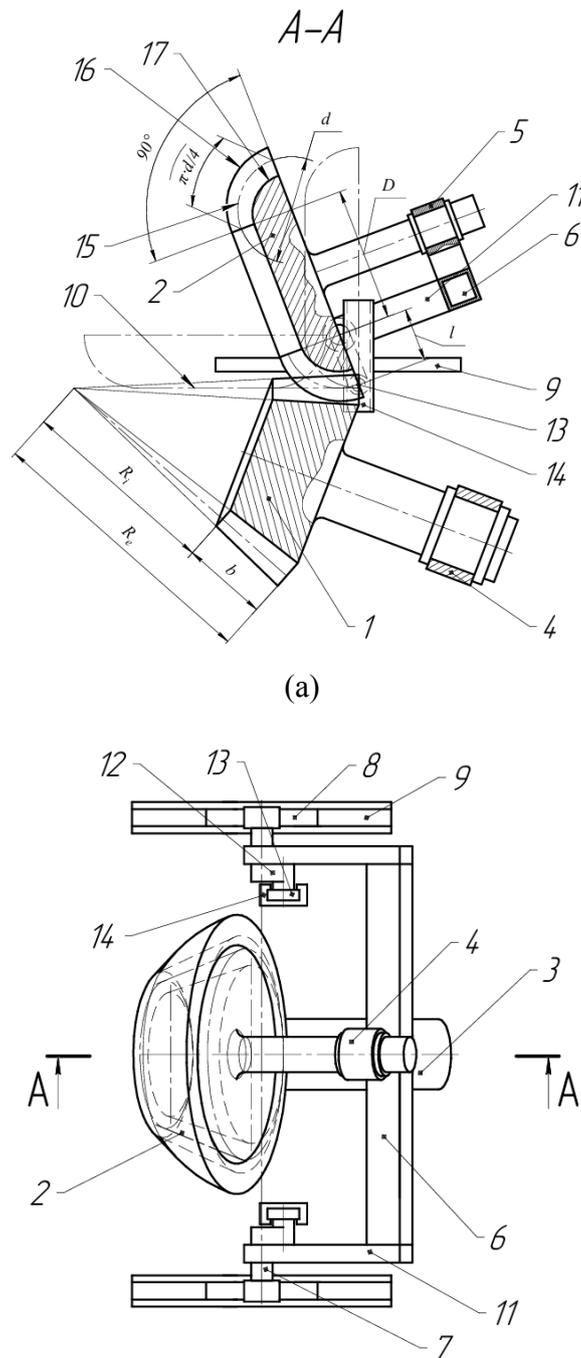


Рис. 3. Схема механизма поворота осей зубчатых колес: фронтальный разрез (а); вид сверху (б)

Также коленчатый вал снабжен двумя синусными механизмами, содержащими смонтированные на внутренних сторонах шек 11 коленчатого вала кривошипами 12, соединенным с ползунами 13, неподвижные направляющие 14 которых расположены перпендикулярно неподвижным направляющим опор коренных шеек коленчатого вала. Длина  $l$  кривошипов равна радиусу  $r = d / 2$  трубы тора делительной поверхности тороидного зубчатого колеса.

Контакт зубьев тороидного и конического колес происходит в точке касания их делительных поверхностей. Это обуславливает возможность поворота осей зубчатых колес вокруг этой точки, являющейся мгновенным центром вращения, относительно друг друга на угол  $\varphi$ , при соответствующем данному повороту смещении  $x = d / 2 \cdot \sin \varphi$  с сохранением сопряжения. Для перекачивания начальных поверхностей в процессе поворота начальная линия 15 на делительной поверхности тороидного зубчатого колеса должна быть окружностью. Равенство расчетных модулей зубьев конического и тороидного колес в каждом положении поворота обеспечивает возможность сохранения зацепления. Для нормальной работы зубчатого зацепления на зубчатом венце поверхности выступов 16 и впадин 17 должны быть отступающими от нее по нормали на высоту головки и ножки зуба, которые пропорциональны модулю зубьев в данной точке, что обеспечивается выполнением соотношений  $h_a = m_\varphi$  и  $h_f = 1,25 \cdot m_\varphi$ .

Расположение опоры для вращательного движения тороидного зубчатого колеса на коленчатом валу, коренные шейки которого смонтированы на ползунах, размещенных в неподвижных направляющих, позволяет обеспечить взаимное смещение колес вдоль образующей конического колеса с сохранением касания делительных поверхностей конического и тороидного зубчатого колес. Синусные механизмы обеспечивают перемещение тороидного зубчатого колеса вдоль образующей конического зубчатого колеса по синусоидальному закону при равномерном повороте тороидного зубчатого колеса. Равенство длины  $l$  кривошипа синусного механизма радиусу  $d / 2$  трубы тора делительной поверхности тороидного зубчатого колеса обеспечивает равенство расчетных модулей конического и тороидного зубчатых колес в каждом взаимном положении их осей.

Равенство длины  $l$  кривошипа радиусу  $r = d / 2$  трубы тора делительной поверхности тороидного зубчатого колеса 2 обеспечивает сопряжение делительных поверхностей конического и тороидного колес. При равномерном взаимном повороте тороидного и конического колес и сопровождающем этот поворот перемещении вдоль делительной поверхности конического колеса по синусоидальному закону в каждом взаимном положении выполняется равенство модулей зубьев конического и тороидного колес в точке контакта  $m_\varphi = m_x$ . Равенство диапазонов изменения модулей обоих зубчатых колес обеспечивается приведенными выше геометрическими соотношениями.

## **ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ**

Предлагаемая зубчатая передача проще по сравнению с прототипом за счет замены одного из тороидальных колес на более технологичное и простое коническое без уменьшения функциональных возможностей зубчатой передачи.

Кроме того, в отличие от прототипа описанная зубчатая передача может иметь отличное от 1:1 передаточное число, что расширяет возможности передачи крутящего момента по сравнению, например, с шарнирами равных угловых скоростей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тимофеев Г.А., Мусатов А.К., Попов С.А., Фролов К.В. Теория механизмов и механика машин. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 568 с.
2. *Зубчатый редуктор*: а. с. 1548556 СССР // Тернюк Н.Э., Устиненко А.В., Ковалюх Р.В. Заявл. 31.05.1988. Опубл. 07.03.1990, Бюл. № 9.
3. Abe K., Tadakuma K., Tadakuma R. ABENICS: Active ball joint mechanism with three-DoF based on spherical gear meshings // *IEEE Transactions on Robotics*. 2021. V. 37. № 5. P. 1806–1825.
4. Патент РФ 2 831 817. *Зубчатая передача* / Головнин А.А., Костылев И.Г. Заявл. 15.05.2024. Опубл. 16.12.2024, Бюл. № 35.

**Для цитирования:** Головнин А.А. Синтез зубчатой передачи с изменяемым углом между осями колес // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 1 (25). С. 5–11.

## SYNTHESIS OF A GEAR TRAIN WITH A VARIABLE ANGLE BETWEEN THE AXLES OF THE WHEELS

A.A. GOLOVNIN, Cand. Sc.

Tver State Technical University,  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: golovninAA@rambler.ru

The article is devoted to the synthesis of a gear train with the possibility of changing the angle between the axles of the wheels. A solution is given for a transmission, one of the gears of which is conical, and the second is toroidal, in which the inner region of the torus is materialized. To do this, the support for the rotational movement of the toroidal gear must be placed on the crankshaft covering it, the root necks of which are mounted on sliders with non-movable guides parallel to the tangent to the dividing cone of the conical gear. The crankshaft is also equipped with a sinus mechanism containing a crank mounted on the cheek of the crankshaft connected to a slider, the non-movable guide of which is located perpendicular to the fixed guiding supports of the main necks of the crankshaft.

*Keywords:* gears, toroidal wheel, rotation of wheel axes.

Поступила в редакцию/received: 30.10.2024; после рецензирования/revised: 07.11.2024;  
принята/accepted: 11.11.2024

## УСТАНОВКА ВАЛА С КОНИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ НА ЦЕНТРАХ СТАНКА

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: arharovanatoliy@yandex.ru

© Архаров А.П., 2025

Представлен анализ известных способов и патронов для установки валов на центрах металлорежущих станков. Отмечена актуальность работы по созданию способа и средства для установки вала с конической поверхностью. Изложена сущность разработанного способа установки, в котором передача крутящего момента от шпинделя станка на вал осуществляется путем закрепления за коническую поверхность. Раскрыто устройство и принцип действия спроектированного патрона с переменным характером движения его зажимных элементов вдоль линии центров. Приведен сравнительный анализ предложенных способа и патрона с аналогичными известными решениями. Отражены оригинальность разработок и достигаемый технический результат.

*Ключевые слова:* вал, установка, коническая поверхность, способ, упорные центры, кулачковый патрон, переменное движение.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-12-17**

### ВВЕДЕНИЕ

К деталям в виде тел вращения относятся, в частности, валы с конической поверхностью и шпиндельные оправки с коническими хвостовиками. Наиболее распространенным способом установки подобных деталей перед их обработкой на металлорежущих станках является установка на центрах станков [1]. Один из вариантов этого способа – размещение заготовки на центрах с расположением вершины ее конуса к переднему центру при помощи различных технологических средств для передачи крутящего момента от шпинделя станка к обрабатываемой заготовке. Широко распространенными средствами являются поводковый патрон, устанавливаемый на шпиндель станка, и хомутик, закрепляемый на поверхности заготовки [2, 3]. В случае передачи крутящего момента через коническую поверхность применяют хомутик с коническим отверстием. Однако установка и снятие хомутика повышают трудоемкость операции. Кроме того, эти приемы, выполняемые вручную, препятствуют использованию автоматической загрузки и разгрузки оборудования.

Снижение трудоемкости выполняемой операции за счет исключения ручной установки и снятия хомутика достигается установкой валов с применением либо поводкового зубчатого патрона с зубьями на его поводковой шайбе [4], либо поводкового патрона со штырями на его колпачке [5], либо рифленых центров станка [6]. При использовании первых двух способов на торцовой поверхности вала остаются следы из-за вдавливания зубьев или штырей, что снижает ее качество. Рифленые центры также деформируют заготовку, точнее, ее базовые поверхности – центровые отверстия. Применение таких деформированных отверстий в качестве баз на

последующих операциях приводит к большой погрешности установки, поэтому они могут быть применены лишь однократно.

Исключить деформации центровых отверстий и торцовых поверхностей заготовки можно за счет использования способа [7] и патрона с переменным характером движения его зажимных элементов [8]. Однако они применимы при передаче крутящего момента от шпинделя станка к заготовке путем закрепления только за ее цилиндрическую поверхность. В случае необходимости установки заготовки на центрах станка и закрепления за ее коническую поверхность требуется разработка новых способа и патрона. Решению этой задачи и посвящена данная статья.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При исследовании применялся структурный анализ описанных в научной литературе и в патентной документации и используемых на практике методов и средств для установки валов на технологическое оборудование. Новые способ и патрон разрабатывались на основе синтеза таких элементов, которые в совокупности образуют единое целое, отвечающее поставленной задаче и критерию оригинальности.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В принятом за основу способе установки заготовки на центрах станка используется кулачковый патрон с упорным центром, а заготовка закрепляется за цилиндрическую поверхность путем переменного движения кулачков в радиальном направлении [9].

В разработанном способе (рис. 1) механизированный патрон 1 с кулачками 2 и 3, выполненными с наклонными рабочими поверхностями 4 и 5, и передним упорным центром 6 устанавливают на шпиндель 7 передней бабки 8 станка. Задний упорный центр 9 устанавливают в пиноль 10 задней бабки 11. При этом кулачки могут совершать переменные независимые возвратно-поступательные движения вдоль оси 0-0 центров 6 и 9.

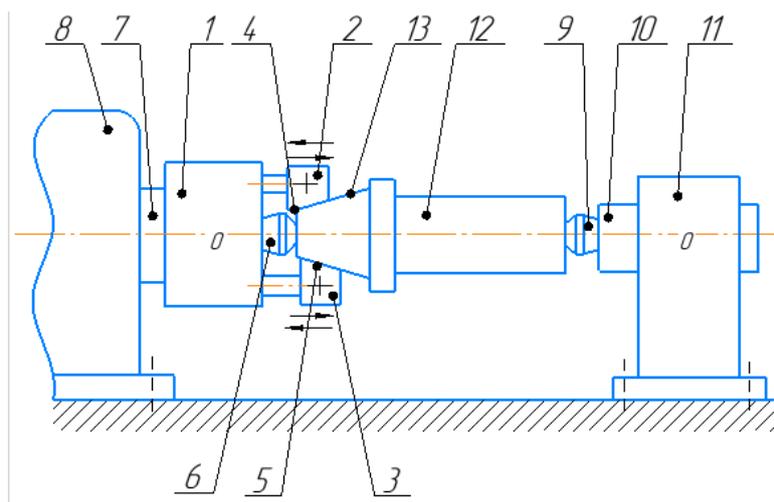


Рис. 1. Схема способа установки вала с конической поверхностью на центрах станка

Вал 12 с наружной конической поверхностью 13 размещают на передний и задний упорные центры, располагая его вершиной упомянутой поверхности к переднему упорному центру, затем от механизма переменного движения (на рис. 1 не показан) механизированного патрона сообщают кулачками переменные перемещения вдоль оси центров 0-0 в направлении к заднему упорному центру. После прижатия одного из кулачков, например кулачка 2, наклонной рабочей поверхностью 4 к конической поверхности приостанавливают его движение, которое возобновляют после прижатия к конической поверхности наклонной рабочей поверхности 5 кулачка 3. Затем вал 12 закрепляют обоими кулачками за коническую поверхность.

При применении механизированного патрона с кулачками, выполненными с наклонными рабочими поверхностями, кулачки прилегают к образующей конической поверхности и закрепляют за нее вал. Переменный характер движения кулачков вдоль оси центров обеспечивает их прилегание к конической поверхности вала независимо от наличия отклонений диаметра этой поверхности, отклонения ее формы в поперечном направлении и отклонения от ее соосности относительно оси центров.

Кроме того, использование в способе патрона, обеспечивающего закрепление вала осевым перемещением кулачков, вместо закрепления радиальным перемещением упрощает установку. Это достигается упрощением преобразования продольных перемещений, получаемых патроном от привода, в перемещения кулачков в осевом направлении.

Способ позволяет также закреплять вал за наклонные поверхности.

Для осуществления разработанного способа необходим механизированный патрон с переменным характером движения кулачков в осевом направлении. При разработке такого патрона за основу был взят патрон, в котором используется механизм преобразования осевых перемещений штока привода в переменные радиальные перемещения кулачков [10].

Спроектированный патрон (рис. 2) устроен следующим образом.

Патрон содержит корпус 1 с центрирующим пояском 2, выполненным на первом его торце, и с отверстиями 3 и 4, цилиндрические стержни 5 и 6 с продольными пазами 7 и 8 соответственно, кулачки 9 и 10 с наклонными рабочими плоскостями 11 и 12 соответственно, фланец 13 с коническим отверстием 14, шток 15, упорный центр 16 с присоединительным конусом 17, двуплечий рычаг 18 с плечами 19 и 20. Отверстия расположены симметрично относительно оси центрирующего пояса. Цилиндрические стержни 5 и 6 сопряжены с отверстиями 3 и 4 соответственно, с возможностью осевых перемещений. Двуплечий рычаг установлен на штоке с возможностью поворотов вокруг оси, перпендикулярной продольной оси штока, а его плечи сопряжены с продольными пазами 7 и 8 соответственно. Фланец закреплен на втором торце корпуса соосно своим коническим отверстием относительно центрирующего пояса. Упорный центр сопряжен присоединительным конусом с коническим отверстием. Кулачки закреплены на стержнях с возможностью прилегания их наклонных плоскостей к конической поверхности 21 вала 22.

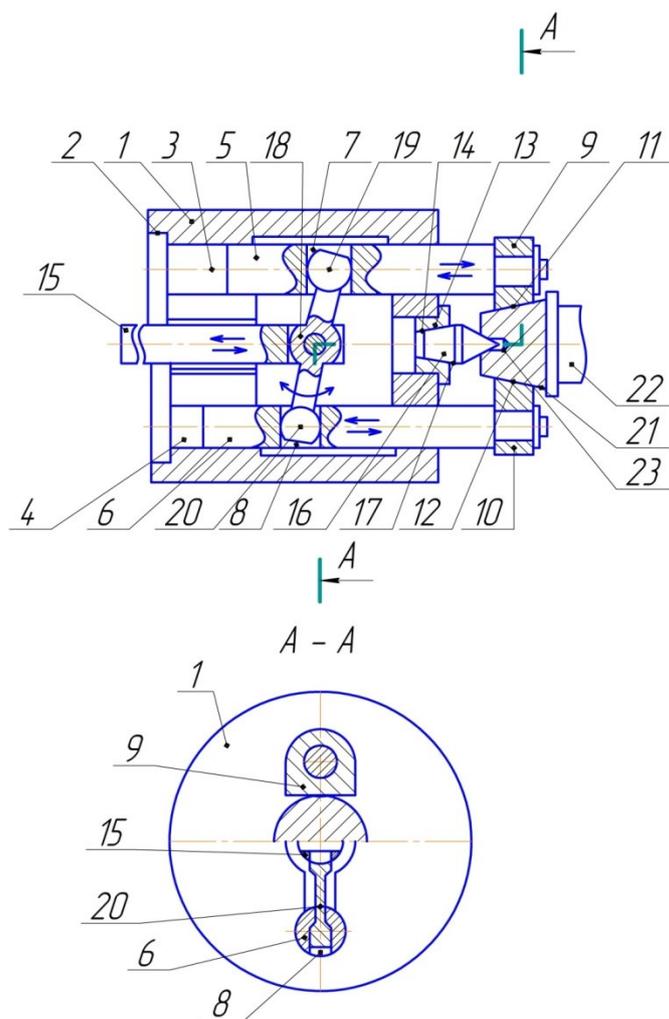


Рис. 2. Схема патрона кулачкового механизированного для установки вала с конической поверхностью на центрах станка

Патрон работает следующим образом. В корпусе патрона, установленного центрирующим пояском на шпинделе станка (на рис. 2 не показан), базируют вал путем установки его одним из центровых отверстий 23 на упорный центр, а другим – на задний центр, закрепленный в пинולי задней бабки станка (на рис. 2 не показаны). От привода сообщают движение штоку. Это осевое перемещение с помощью плеч двуплечего рычага через гнезда 7 и 8 преобразуется в осевые переменные перемещения цилиндрических стержней 5 и 6. При соприкосновении одной из наклонных рабочих плоскостей, например плоскости 11 с конической поверхностью приостанавливается осевое перемещение цилиндрического стержня 5 с кулачком 9. Приостановленное осевое перемещение возобновляется после прилегания наклонной плоскости 12 кулачка 10 к конической поверхности. Дальнейшими совместными осевыми перемещениями цилиндрических стержней закрепляют кулачками вал за коническую поверхность.

По сравнению с известным патроном [10] закрепление кулачков на толкателях позволяет кулачкам совершать переменные движения в осевом направлении, что упрощает механизм преобразования перемещений штока в переменные движения кулачков за счет исключения из этого механизма клиновых выступов и клиновых пазов, их сопряжений между собой, ползунов и радиальных пазов в корпусе.

Выполнение толкателей в виде цилиндрических стержней, а направляющих для них – в виде отверстий также упрощает конструкцию патрона.

Переменные движения кулачков в осевом направлении при закреплении за коническую поверхность не нарушают базирование вала на упорном центре, даже если коническая поверхность имеет погрешность формы и/или отклонение от симметричности относительно центрального отверстия, а также в случае возможного отклонения от симметричности рабочих поверхностей кулачков относительно оси упорного центра. Закрепление за коническую поверхность обеспечивает передачу крутящего момента от шпинделя вала через упомянутую поверхность при последующей обработке.

Таким образом, патрон обеспечивает закрепление вала за коническую поверхность при его установке на центрах станка.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены достоинства и недостатки используемых способов и патронов для установки заготовок в виде валов на технологическом оборудовании. Разработанные способ и патрон позволяют передавать крутящий момент заготовке, установленной на центрах станка, путем закрепления ее за коническую поверхность. При этом переменный характер движения кулачков вдоль линии центров позволяет устранить деформацию закрепляемой поверхности, вызванную погрешностью ее формы и расположения относительно рабочих поверхностей кулачков. Кроме того, за счет сокращения кинематической цепи передачи движения от привода к кулачкам упрощена конструкция патрона. Способ и патрон могут быть использованы при установке валов с конусами и наклонными плоскостями на центрах металлорежущих станков.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология машиностроения. В 2 кн.: учебное пособие для вузов. Кн. 1: Основы технологии машиностроения // Э.Л. Жуков [и др.]; под ред. С.Л. Мурашкина. 3-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2008. 278 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение-1, 2001. Т. 2. 944 с.
3. ГОСТ 2571-71. Патроны токарные поводковые. М.: Издательство стандартов, 1981. 7 с.
4. Беспалов Б.Л., Глейзер Л.А., Колесов И.М. Технология машиностроения: учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1973. 448 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 5-е изд., испр. М.: Машиностроение-1, 2003. Т. 1. 912 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. 7-е изд. М.: Инновационное машиностроение, 2023. Т. 2. 818 с.
7. Архаров А.П. Способ переустановки заготовки в трехкулачковый механизированный патрон // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 3 (11). С. 20–23.
8. Патент РФ 2655417. *Патрон двухкулачковый клиновой механизированный* / Архаров А.П., Павлов А.В. Заявл. 18.07.2017. Опубл. 28.05.2018, Бюл. № 16.
9. Архаров А.П., Митюшин С.С. Способ установки заготовки на центрах токарного станка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 36–39.

10. Архаров А.П. Патрон клиновой механизированный для установки заготовки на центрах токарного станка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 1 (5). С. 21–26.

**Для цитирования:** Архаров А.П. Установка вала с конической поверхностью на центрах станка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 12–17.

## **SHAFT WITH A TAPERED SURFACE INSTALLATION ON THE CENTERS OF THE MACHINE**

A.P. ARKHAROV, Cand. Sc.

Tver State Technical University,  
22, Af. Nikitinemb., Tver, 170026, e-mail: arharovanatoliy@yandex.ru

An analysis of known methods and chucks for installing shafts on the centers of metal-cutting machines is presented. The relevance of the work on creating a method and means for installing a shaft with a conical surface is noted. The essence of the developed installation method is outlined, in which the transmission of torque from the machine spindle to the shaft is carried out by fixing it to its conical surface. The device and operating principle of the designed jaw chuck with a variable nature of movement of its clamping elements along the center line are disclosed. Comparative analyzes of the designed method and jaw chuck with similar known solutions were carried out. The development originality and the achieved technical result are reflected.

*Keywords:* shaft, installation, tapered surface, method, thrust centers, jaw chuck, alternating motion.

Поступила в редакцию/received: 27.11.2024; после рецензирования/revised: 02.12.2024;  
принята/accepted: 05.12.2024

УДК 621.785.54

## **МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ МНОГОКАНАЛЬНЫМ ЛАЗЕРОМ**

Н.М. ГАНЧЕВ, асп., К.А. САХАРОВ, асп., Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук

Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

© Ганчев Н.М., Сахаров К.А., Афанасьева Л.Е., 2025

Проведены металлографические исследования конструкционной стали марки 30ХНЗА в зоне лазерной закалки. Термоупрочнение образцов выполняли с помощью непрерывного излучения многоканального СО<sub>2</sub>-лазера на различных режимах. Показано, что данный тип лазеров, в отличие от однолучевых, обладает однородностью тепловложения по ширине полосы упрочнения. В зоне лазерной закалки на

оптимальном режиме сталь имеет структуру мартенсита с микротвердостью ~7 500 МПа. Глубина упрочненного слоя составляет ~1,3 мм. Показана эффективность применения многоканального CO<sub>2</sub>-лазера для закалки конструкционной стали.

*Ключевые слова:* конструкционная сталь, лазерная закалка, многоканальный лазер, микроструктура, мартенсит, микротвердость.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-17-24**

## ВВЕДЕНИЕ

Применение лазерного излучения в обработке материалов началось в 1960-е годы, вскоре после изобретения лазеров. Экспериментально был продемонстрирован высокий потенциал лазерных технологий сварки, резки и обработки поверхности. Однако только с разработкой в 1980-х годах мощных лазеров непрерывного действия лазерная закалка стала жизнеспособной промышленной технологией [1].

Первоначально лазерная закалка использовалась в основном в аэрокосмической и автомобильной промышленности, где требовалось улучшение свойств контактных поверхностей деталей [1]. В настоящее время технологии лазерного термоупрочнения эффективно применяются в системе железнодорожного транспорта, машино- и станкостроении, в металлургии, в сфере нефтегазодобычи и геологоразведки, в производстве, ремонте дорожно-строительной техники, газотурбинных двигателей, инструментов и многих других отраслях. Широкомасштабное освоение технологии лазерного термоупрочнения позволяет экономить материальные, энергетические, трудовые и финансовые ресурсы [2–4].

Основной принцип технологии лазерной закалки основан на точном контроле тепловой энергии. Регулируя технологические параметры, такие как мощность излучения, диаметр пятна, скорость сканирования, можно получать нужную глубину и твердость обработанного слоя в соответствии с конкретными требованиями [4–6]. Точность установки параметров, контроль и автоматизация процесса лазерной закалки делают ее критически важной технологией в современном производстве [7].

Технология закалки заключается в лазерном нагреве поверхностного слоя изделия до температуры выше критической точки, при которой происходит фазовое превращение, затем следует быстрое охлаждение за счет отвода тепла в более холодную нижележащую часть материала. Высокие скорости нагрева и охлаждения приводят к закалке поверхностного слоя и улучшению его характеристик, не влияя на структуру и свойства глубинных слоев.

Понимание основных принципов и механизмов взаимодействия лазерного излучения с материалом при лазерной закалке, а также рациональный выбор типов используемых лазеров имеет решающее значение для оптимизации процесса и достижения желаемых свойств материала.

Анализ литературных источников показывает, что общее состояние исследований по лазерному упрочнению стали хорошо развито и наблюдается растущее промышленное применение [6–11]. Лазерное упрочнение поверхности стало перспективным методом замены традиционной термической обработки, позволяющим обеспечить повышение ряда эксплуатационных характеристик материалов: износостойкости, коррозионной стойкости, теплостойкости и некоторых других. Улучшение эксплуатационных характеристик деталей после лазерной закалки обусловлено такими факторами, как повышение твердости поверхности и дисперсности структуры, снижение коэффициента трения [7].

Неравномерность свойств локальных участков обработанной поверхности (например, образование зон отпуска при перекрытии дорожек упрочнения) может снижать эффективность упрочнения. Большое значение имеет однородность интегрального тепловложения по ширине полосы упрочнения. Применение однолучевых лазеров с гауссовым распределением энергии в луче не обеспечивает эту равномерность без использования специальной сложной оптической системы. Многоканальный лазерный излучатель с оптимизированным распределением плотности мощности в пятне позволяет получить более высокие, по сравнению с однолучевыми лазерами, характеристики упрочняемого слоя материала [4, 5, 12].

Цель настоящей статьи – исследовать возможности использования многоканальных CO<sub>2</sub>-лазеров для лазерной закалки конструкционной стали 30ХН3А.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Конструкционная сталь марки 30ХН3А (ГОСТ 4543-71) обладает повышенными прочностными свойствами в сочетании с хорошей пластичностью, вязкостью, высоким сопротивлением развитию трещин. Она применяется для изготовления крупных деталей ответственного назначения. Химический состав стали приведен в табл. 1.

Таблица 1. Массовая доля элементов в стали 30ХН3А, %

C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe и примеси
0,27...0,33	0,17...0,37	0,30...0,60	0,6...0,9	2,75...3,15	Остальное

Лазерному упрочнению подвергались образцы стали марки 30ХН3А размером 9 × 15 × 100 мм после объемной закалки и высокотемпературного отпуска (улучшения). Лазерную закалку без оплавления поверхности выполняли с помощью непрерывного излучения многоканального (48 лучей) CO<sub>2</sub>-лазера на комплексе модели ЦЛТ-Ю-5 с мощностью выходного излучения 5 кВт. Использовали лазерный излучатель с трубками, скомпонованными в виде пакета, состоящего из вложенных один внутри другого четырех восьмигранников (патент РФ № 2580350) [12]. Данный лазер обладает оптимизированным распределением плотности мощности и времени экспозиции в точках по сечению дорожки упрочнения, наиболее полно отвечает требованиям для качественного термоупрочнения.

Режимы обработки даны в табл. 2. Каждый образец упрочнялся двумя полосами с перекрытием 30 % по линейной схеме. На рис. 1 представлено изображение поперечного сечения макрошлифа одного из полученных образцов.

Микроструктуру выявляли химическим травлением шлифов 3%-м раствором азотной кислоты и изучали с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT. Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450-76 при усилии 1,96 Н. В качестве индентора использовали алмазную четырехгранную пирамиду с квадратным основанием.

Таблица 2. Режимы лазерной закалки

№ образца	Мощность, Вт	Диаметр пятна, мм	Скорость, мм/с	Плотность мощности, 10 <sup>8</sup> Вт/м <sup>2</sup>	Время экспозиции, с
1	2 400	6	15	0,85	0,4
2	2 400	6	10	0,85	0,6
3	2 400	8	10	0,48	0,8

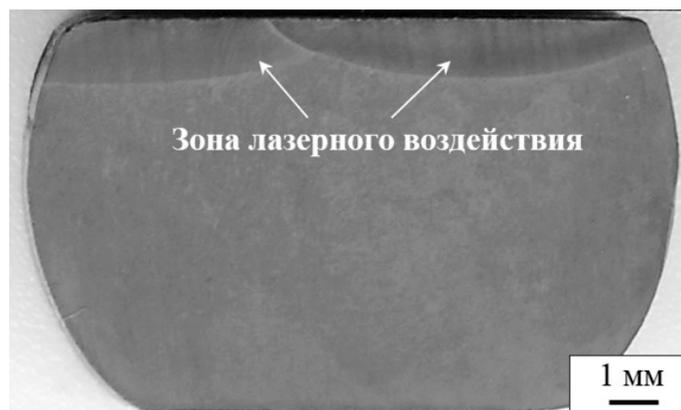


Рис. 1. Изображение макрошлифа поперечного сечения образца № 2.  
Глубина лазерной закалки 1,37 мм

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Свойства зоны лазерного воздействия зависят от многих параметров, прежде всего от температуры нагрева, времени выдержки в нагретом состоянии и скорости охлаждения. Результат лазерной закалки зависит также от исходного состояния материала после предварительной механической и термической обработки.

Конструкционная сталь 30ХН3А в исходном состоянии имеет структуру сорбита (феррито-карбидная смесь) с микротвердостью около 4 000 МПа (рис. 2а). Известно, что в феррите содержится малое количество углерода, тогда как в карбидах углерода значительно больше, т.е. структура стали химически неоднородна [13].

При лазерной закалке происходит нагрев поверхностного слоя в области температур устойчивого существования аустенита (приблизительно от 800 до 900 °С для большинства сталей). Для увеличения глубины закаленного слоя возможен нагрев стали на поверхности вплоть до температуры плавления. При этих температурах феррито-карбидная смесь превращается в аустенит, который имеет гранецентрированную кубическую решетку и способен растворять большее количество углерода по сравнению с ферритом.

Металлы обычно обладают высокой теплопроводностью и могут быстро передавать тепло от нагретого поверхностного слоя к более холодному нижележащему материалу. Это свойство выгодно для лазерной закалки, поскольку оно обеспечивает быстрое самозакаливание поверхностного слоя без заметного изменения свойств основной части детали. При охлаждении со скоростью выше критической в стали происходит мартенситное превращение. Мартенсит представляет собой пересыщенный твердый раствор углерода в железе с объемноцентрированной тетрагональной кристаллической решеткой [13]. Мартенсит значительно тверже, чем исходные фазы, что обусловлено в первую очередь искаженной структурой его решетки, которая препятствует движению дислокаций. В результате высокоскоростной перекристаллизации увеличивается дисперсность структуры, карбиды растворяются в металлической матрице, что повышает химическую однородность. Благодаря этому в зоне упрочнения формируется мартенсит тонкой структуры и повышенной микротвердости (рис. 2б–г).

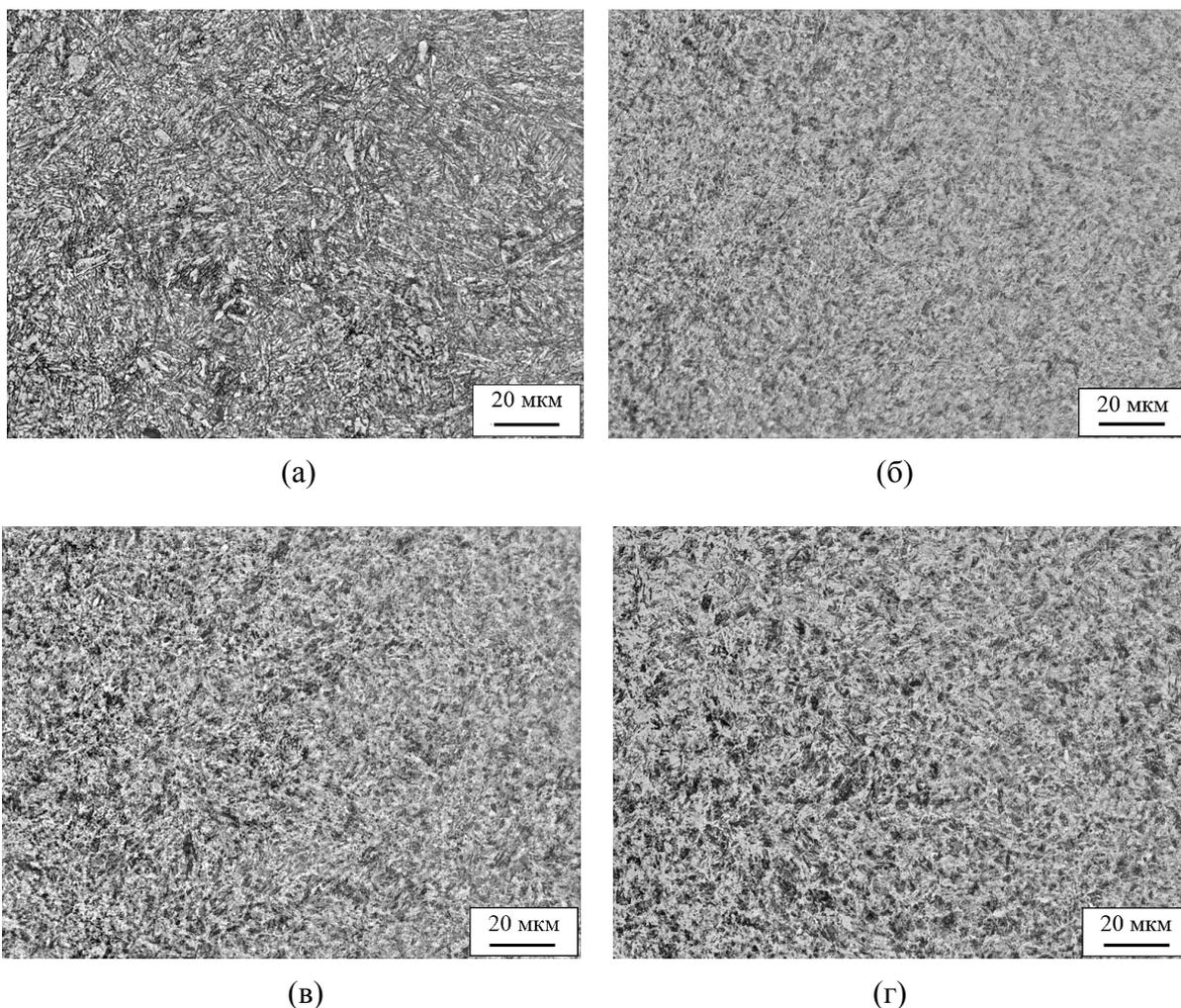


Рис. 2. Микроструктура стали 30XН3А: вне зоны лазерного воздействия (а); в зоне лазерной закалки; образцы № 1, 2, 3 ((б), (в), (г) соответственно)

Распределение микротвердости по глубине упрочненных слоев представлено на рис. 3. Глубина закаленного слоя зависит от таких факторов, как мощность лазерного излучения, скорость сканирования и тепловые свойства металла. Время экспозиции при лазерной закалке, равное отношению диаметра пятна излучения к скорости сканирования, для первого образца меньше, чем для остальных. В результате на образце № 1 получен упрочненный слой с градиентным распределением микротвердости по глубине (рис. 3). На расстояние до 0,5 мм от поверхности сталь имеет высокую микротвердость (7 600...7 900 МПа). Далее наблюдается плавный спад до исходных значений.

Упрочнение образца № 2 выполнялось с той же плотностью мощности, что и образца № 1. Было увеличено время экспозиции. В результате получено более однородное распределение микротвердости на большей глубине. Максимальные значения микротвердости составляли 7 100...7 400 МПа на расстоянии до 0,8 мм от поверхности образца.

Образец № 3 упрочняли на режиме с меньшей плотностью мощности. Так как диаметр пятна был увеличен до 8 мм, возросло время экспозиции. В результате получена пониженная по сравнению с предыдущими образцами микротвердость 6 000...6 300 МПа, что может быть связано с более низкими температурами нагрева стали в зоне упрочнения.

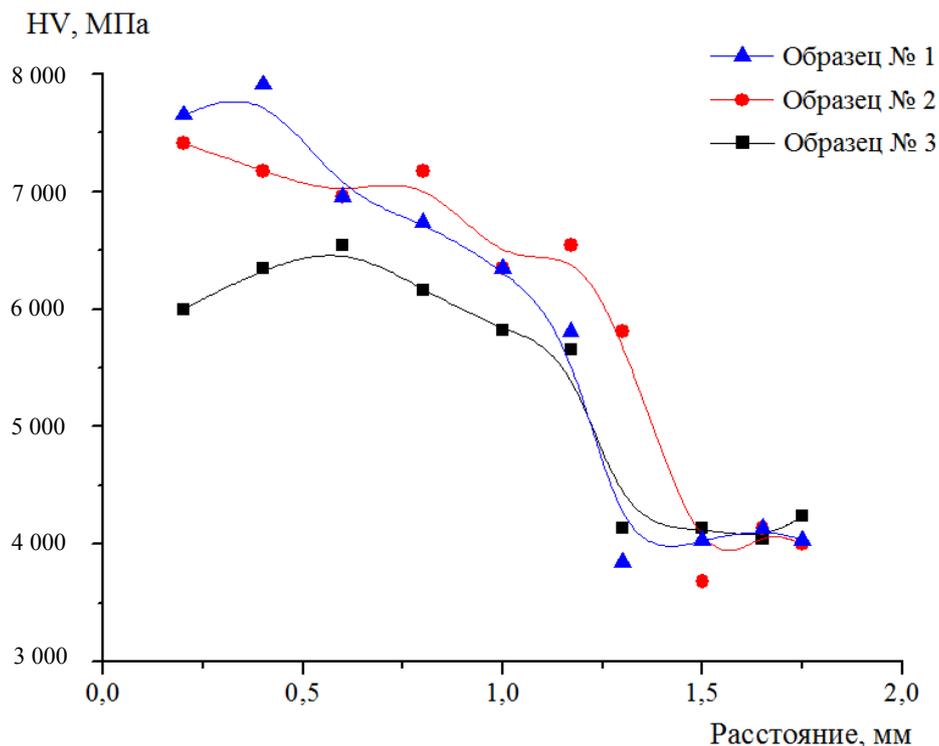


Рис. 3. Распределение микротвердости по глубине упрочненных слоев

Как известно, более чем в 70 % случаев выход из строя механизмов и машин происходит вследствие износа трущихся поверхностей деталей на глубину 0,3...0,5 мм [4, 14–16], т.е. свойства поверхностного слоя глубиной до 0,5 мм во многом определяют ресурс деталей. Следовательно, выполнение лазерной закалки на режимах № 1 и 2 обеспечивает необходимую глубину и твердость упрочненного слоя.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненной работы показали возможности и высокую эффективность применения многоканального CO<sub>2</sub>-лазера для закалки конструкционной стали 30ХН3А. Изменяя технологические параметры обработки, можно добиться требуемой структуры и свойств рабочих поверхностей детали на необходимую глубину, что повышает маневренность при планировании срока службы. Применение многоканальных лазеров обеспечивает более высокую равномерность глубины упрочняемой зоны за счет оптимизированного распределения интенсивности излучения в пятне обработки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Łach Ł. Recent advances in laser surface hardening: Techniques, modeling approaches, and industrial applications // *Crystals*. 2024. V. 14. № 8. P. 726.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ, 2006. 664 с.
3. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. М.: Физматлит, 2009. 664 с.
4. Югов В.И., Афанасьева Л.Е., Барабонова И.А., Раткевич Г.В. Упрочнение конструкционной стали с помощью многоканального CO<sub>2</sub> лазера // *Письма о материалах*. 2017. Т. 7. № 1. С. 8–11.

5. Афанасьева Л.Е., Югов В.И. Повышение износостойкости сталей с помощью закалки многоканальным лазером // *Технология металлов*. 2018. № 3. С. 23–26.
6. Maharjan N., Zhou W., Wu N. Direct laser hardening of AISI 1020 steel under controlled gas atmosphere // *Surface and Coatings Technology*. 2020. V. 385. P. 125399.
7. Babu P.D., Marimuthu P. Status of laser transformation hardening of steel and its alloys: a review // *Emerging Materials Research*. 2019. V. 8. № 2. P. 188–205.
8. Lasota I., Protsenko V., Matyushkin A., Kuznetsov M., Gook S. Laser surface hardening of engine camshaft cams // *Materials Today: Proceedings*. 2020. V. 30. P. 478–482.
9. Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. О характеристиках изнашивания стальных поверхностей, упрочненных лазерным излучением // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 38–46.
10. Muthukumar G., Dinesh Babu P. Laser transformation hardening of various steel grades using different laser types // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2021. V. 43. P. 1–29.
11. Li J., Yan H., Li S., Lei M. Microstructure and wear behavior of arc-shaped 40CrNiMo steel after laser hardening // *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. V. 24. P. 5743–5754.
12. Патент РФ 2580350. Устройство для упрочнения поверхности детали / Югов В.И. и др. Заявл. 05.11.2014. Оpubл. 10.04.2016, Бюл. № 10.
13. Арзамасов Б.В., Макарова В.И., Мухин Г.Г., Рыжов Н.М., Силаева В.И. Материаловедение: учебник для вузов / под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. 8-е изд. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 648 с.
14. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 212 с.
15. Афанасьева Л.Е., Югов В.И., Гречишкин Р.М. Металлографический мониторинг качества закалки, проводимой с помощью многоканального лазера // *Контроль. Диагностика*. 2017. № 4. С. 36–39.
16. Югов В.И. Высокоэффективная технология ресурсосбережения: лазерная поверхностная обработка // *Фотоника*. 2012. № 4. С. 12–20.

**Для цитирования:** Ганчев Н.М., Сахаров К.А., Афанасьева Л.Е. Металлографический анализ конструкционной стали после закалки многоканальным лазером // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 17–24.

## **METALLOGRAPHIC ANALYSIS OF STRUCTURAL STEEL AFTER HARDENING WITH MULTICHANNEL LASER**

N.M. GANCHEV, Postgraduate, K.A. SAKHAROV, Postgraduate,  
L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc.,

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ludmila.a@mail.ru

Metallographic studies of structural steel grade 30KH3A in the laser hardening zone were carried out. Thermal hardening of samples was performed using continuous radiation of a multichannel CO<sub>2</sub> laser in various modes. It was shown that, unlike single-beam lasers, this

type of lasers has uniform heat input across the hardening strip width. In the laser hardening zone in the optimal mode, the steel has a martensite structure with a microhardness of ~7 500 MPa. The depth of the hardened layer is ~1.3 mm. The efficiency of using a multichannel CO<sub>2</sub> laser for hardening structural steel is shown.

*Keywords:* structural steel, laser hardening, multichannel laser, microstructure, martensite, microhardness.

Поступила в редакцию/received: 02.12.2024;  
после рецензирования/reviced: 05.12.2024; принята/accepted: 10.12.2024

УДК 621.74.08

## СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ЧУГУННЫХ ОТЛИВОК СТЕКЛОФОРМ

И.А. СМОЛЯКОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, А.И. ИВАНОВА<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук,  
Л.Е. АФАНАСЬЕВА<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук

<sup>1</sup>Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ludmila.a@mail.ru

<sup>2</sup>Тверской государственный университет  
170100, Тверь, ул. Желябова, 33, e-mail: alex.ivanova33@yandex.ru

© Смолякова И.А., Иванова А.И., Афанасьева Л.Е., 2025

Исследованы микроструктура, химический и фазовый состав заготовок серого чугуна для стеклоформ. Обоснована необходимость контроля фазового состава чугуна и формирования отдельных структурных составляющих в процессе послойного затвердевания отливки для обеспечения повышенных эксплуатационных свойств деталей формокомплекта, работающих в тяжелых условиях циклических термических нагрузок и абразивного износа.

*Ключевые слова:* стеклоформа, формокомплект, чугун, фазовый состав, микроструктура, микротвердость, износостойкость.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-24-31**

### ВВЕДЕНИЕ

Производство стеклоформирующей оснастки, применяемой для массового выпуска стеклянной тары, относится к важным отраслям промышленности: формовую оснастку в нашей стране изготавливают более чем на 100 заводах [1, 2]. Однако в 2000...2010 годы конкуренция за рынки сбыта стеклоформирующей оснастки обеспечила на территории России преимущество иностранным импортерам: использование оборудования, зависящего от деталей исключительно зарубежного производства, достигло 87 % [1]. К 2015 году доля отечественных производителей на рынке стеклоформирующей оснастки составляла менее 15 % в денежном эквиваленте [1, 2].

Основным сдерживающим фактором является неэффективная технология изготовления изделий и, как следствие, низкий ресурс формовой оснастки. На каждом заводе используются свои технологические циклы, зачастую далекие от совершенства. Между тем от того, насколько качественно выполнено литье пресс-форм, зависит

стойкость формокомплекта. По доле выпуска чугунного литья Россия входит в тройку ведущих стран-производителей. Необходимо кардинальное переосмысление технологии производства деталей данного типа с учетом конкуренции с зарубежными поставщиками подобной продукции [1]. Для успешного решения данного вопроса в настоящий момент имеются все возможности.

Минимальной стоимостью обладают формы, ресурс которых составляет 200...400 тысяч термоциклов. Их изготавливают из экономно легированных чугунов. Формовые комплекты из чугуна, рабочие кромки которых дополнительно упрочняют нанесением износостойкого покрытия, выдерживают 400...550 тысяч термоциклов, однако их стоимость на 20...30 % выше. В настоящее время наблюдается интенсивный рост потребления стеклянной тары, что формирует спрос на высококачественную формовую оснастку, пригодную для эксплуатации на линии до 700...1 000 тысяч съёмов при низких затратах на ее изготовление [3].

Формовой комплект для литья стеклотары обеспечивает получение конкретного изделия от капли расплавленного стекла с температурой около 1 200 °С до готовой продукции. Повышение стойкости литьевых пресс-форм относится к актуальным задачам, что обусловлено объемом и многообразием выпускаемой продукции [4–6].

Сроки эксплуатации стеклоформ, как правило, определяются износостойкостью их рабочих поверхностей – формующей полости, острых кромок формующей полости и соприкасающихся поверхностей замка сцепления. Наибольшему износу (тепловому, абразивному, адгезионному, высокотемпературному окислительному, усталостному) подвержены рабочие кромки формующей полости стеклоизделий [7, 8].

Существуют следующие способы упрочнения стеклоформ: нанесение наплавочных материалов, диффузионное, электролитическое хромирование, никелирование и некоторые другие. Поскольку изнашиванию подвергаются относительно тонкие слои, в данном случае весьма эффективны поверхностные упрочнения, наплавки, покрытия. Перспективным вариантом получения литой заготовки является процесс затвердевания отливки с максимальным тепловым градиентом [9–12].

Цель настоящей статьи – комплексное исследование структуры серого чугуна, полученного литьем на металлический холодильник.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали образцы чугуна марки К250 с пластинчатым графитом производства фирмы Fonderie Valdelsane (Италия). Химический состав чугуна по данным изготовителя, % масс:

C – 3,55 ± 0,10;

Si – 2,0 ± 0,20;

Mn – 0,6 ± 0,10;

Cr – 0,15 ± 0,05;

Ni < 0,2;

Ti < 0,2;

S < 0,05;

P < 0,1;

Fe – основа.

Исследование микроструктуры выполняли с помощью оптического металлографического микроскопа Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT и электронного микроскопа JEOL JSM-6610LV. Химический состав чугуна определяли методом рентгено-спектрального микроанализа с использованием энергодисперсионного спектрометра Oxford INCA Energy 350.

Измерение микротвердости HV проводили на нетравленных шлифах методом восстановленного отпечатка согласно ГОСТ 9450-76 с помощью отечественного прибора ПМТ-3. Применяли индентор в виде алмазной пирамиды с углом при вершине  $136^\circ$ . Усилие на индентор составляло 1,96 Н (200 г).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При литье чугуна на холодильник возможно управлять интенсивностью теплообмена между отливкой и формой, обеспечивая в поверхностных слоях высокую скорость охлаждения расплава и формирование градиентной микроструктуры высокой дисперсности [12]. На рис. 1 даны полученные при разных увеличениях изображения микроструктуры чугуна вблизи стеклоформирующей поверхности.

При послойном затвердевании отливки от стеклоформирующей поверхности на глубине до 400 мкм формируется мелкодисперсная микроструктура. Фазовый состав чугуна – феррит и эвтектика с включениями графита размером 1...3 мкм. При малом увеличении этот участок выглядит в виде светлой полосы в верхней левой части рис. 1 (этот слой будем называть первым). Далее располагается слой чугуна с мелкопластинчатым графитом толщиной 12...14 мм (второй слой). Размер графитовых включений увеличивается до 35...40 мкм. Металлическая основа чугуна – феррит, содержание перлита составляет до 5 %.

Несмотря на значительное различие в размере и распределении графитовых включений (рис. 2), микротвердость в первом и втором слое одинакова, около  $205 \pm 5$  HV. Это подтверждает, что отбела чугуна в первом слое нет.

С удалением от стеклоформирующей поверхности на расстояние более 14 мм размер графитовых включений начинает увеличиваться (рис. 3). На расстоянии 25 мм от стеклоформирующей поверхности графитовые пластинки достигают около 200 мкм, микротвердость по сравнению с первым и вторым слоями становится ниже ( $190 \pm 20$  HV).

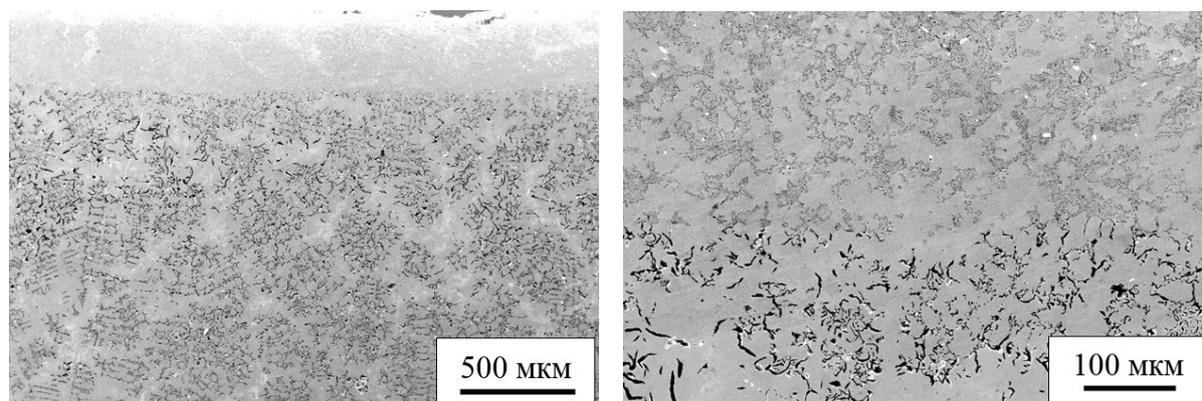


Рис. 1. Микроструктура чугуна вблизи стеклоформирующей поверхности.  
Растровая электронная микроскопия

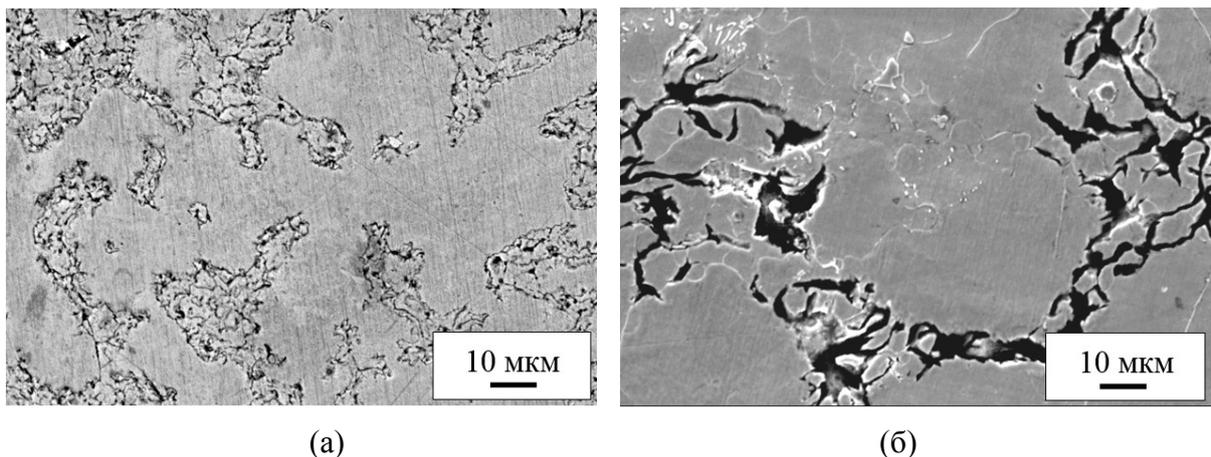


Рис. 2. Микроструктура чугуна в первом (а) и во втором (б) слое.  
Растровая электронная микроскопия

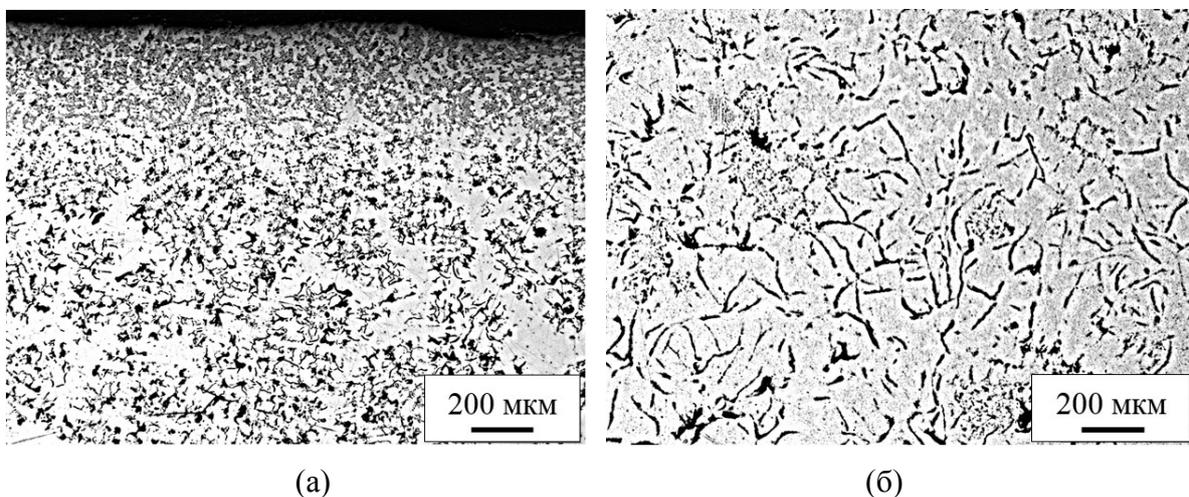


Рис. 3. Микроструктура чугуна вблизи стеклоформирующей поверхности (а)  
и на расстоянии 25 мм (б). Нетравленный шлиф. Оптическая микроскопия.

На рис. 4 и 5 представлены результаты рентгеноспектрального микроанализа, выполненного вблизи стеклоформирующей поверхности. Химический состав чугуна определяли на восьми разных участках. Спектр 1 – усредненный по полю зрения (выделен большим прямоугольником). Выявлены кислород, кремний, марганец, углерод и железо. Распределение химических элементов по спектрам, % масс, приведено ниже:

№ спектра	C	O	Al	Si	V	Mn	Fe	Mo
1	7,6	4,1	–	2,2	–	0,6	85,6	–
2	6,4	–	–	1,5	–	0,7	91,4	–
3	6,8	–	–	1,5	–	0,4	91,3	–
4	6,3	6,8	–	2,4	–	2,0	82,5	–
5	7,5	5,7	–	2,6	–	0,5	83,6	–
6	7,1	50,1	40,3	–	–	–	2,5	–
7	9,6	41,9	28,5	0,4	–	–	19,5	–
8	12,4	–	–	1,5	0,6	0,4	81,1	4,0

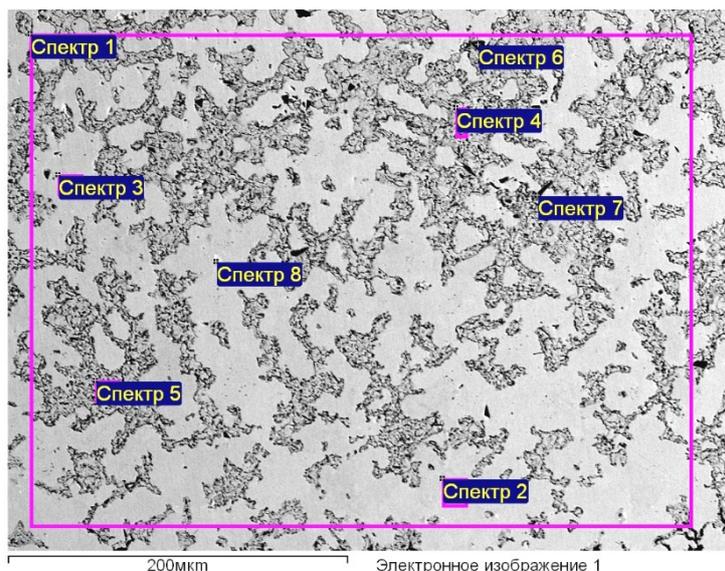


Рис. 4. Рентгеноспектральный микроанализ поверхности чугуна: электронно-микроскопический снимок, прямоугольниками обозначены зоны микроанализа

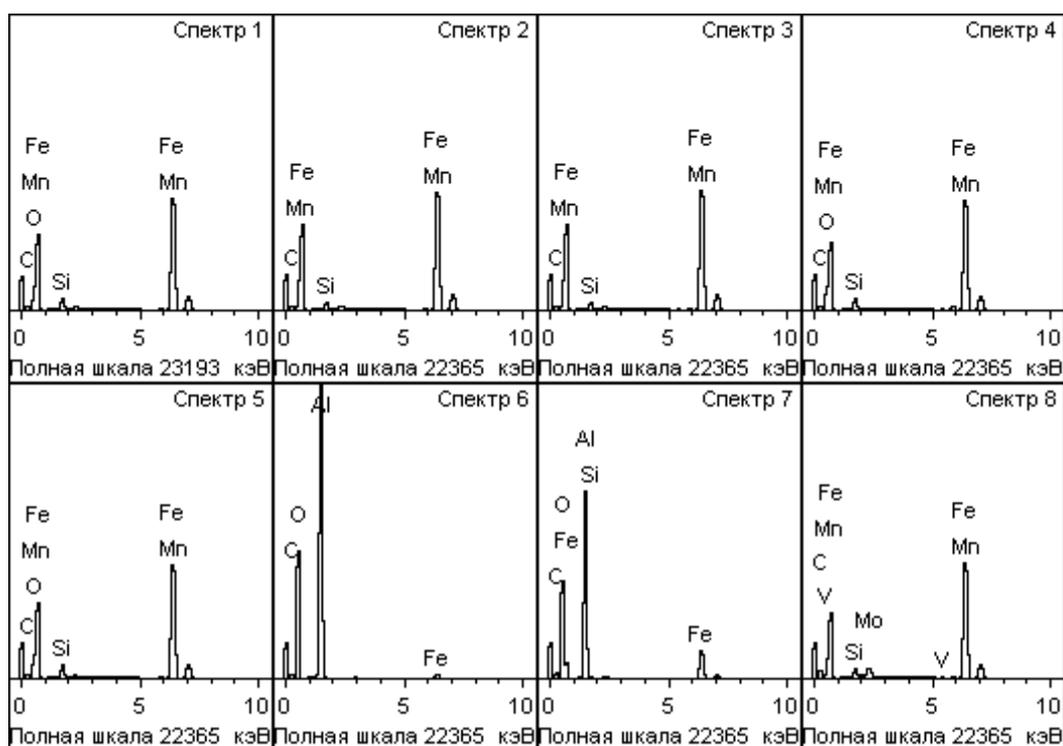


Рис. 5. Рентгеноспектральный микроанализ поверхности чугуна: спектры исследуемых участков

Остальные участки локальные. Спектры 2 и 3 показывают химический состав металлической матрицы – феррита, 4 и 5 – эвтектики. Спектры 6 и 7 (черные точки на шлифе), вероятно, являются оксидами алюминия. Спектр 8 показывает распределение элементов в сложнелегированном карбиде, содержащем молибден и ванадий (белое включение на поверхности шлифа).

На рис. 6 и 7 представлены результаты рентгеноспектрального микроанализа участка, расположенного на расстоянии 5 мм от стеклоформирующей поверхности. Участок обозначен как «Спектр 1» и выделен прямоугольником. Выявлены углерод, кремний, марганец и железо. Распределение массового содержания химических элементов показано ниже:

Элемент	C	Si	Mn	Fe
% масс	19,6	1,6	0,6	78,2

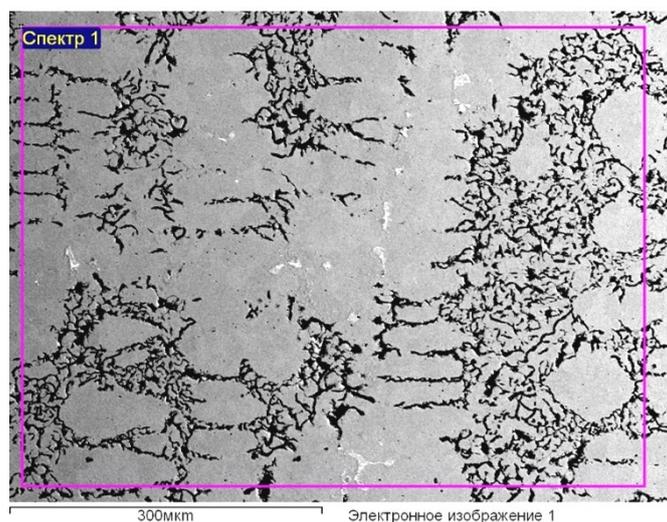


Рис. 6. Рентгеноспектральный микроанализ поверхности чугуна: электронно-микроскопический снимок

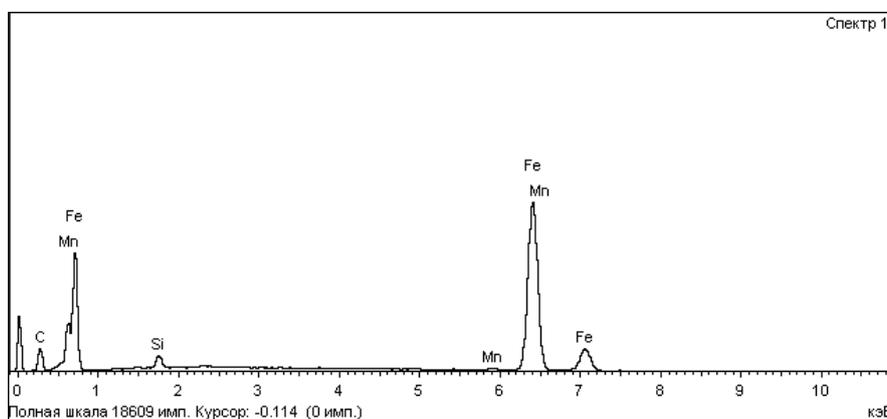


Рис. 7. Рентгеноспектральный микроанализ поверхности чугуна: спектр исследуемого участка

Первый показатель, определяющий стойкость стеклоформ, – микроструктура чугуна на глубине до 15 мм, которая соответствует зоне рабочего слоя формы после механической обработки. Необходимо получение на рабочей поверхности стеклоформ очень мелкого и однородного графита с целью улучшения обрабатываемости, полировки поверхности и повышения трещиностойкости металлоформ при циклическом воздействии высоких температур [11, 12].

Другим показателем, определяющим теплопроводность и отсутствие коробления форм, является микроструктура чугуна на глубине 25...40 мм. Основное требование, предъявляемое к структуре слоев на таких глубинах в отливках для деталей стеклоформ, состоит в наличии крупных включений графита, обеспечивающих высокую теплопроводность и, соответственно, пониженные термические напряжения в эксплуатируемых деталях [12]. Теплопроводность повышается также с увеличением количества феррита в структуре матрицы чугуна, что обуславливает применение для деталей такого типа именно ферритной металлической основы [12].

Литье чугуна на холодильник позволяет сформировать в отливке слоистую микроструктуру с требуемым распределением структурных и фазовых компонентов.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведены металлографические исследования отливки серого чугуна для стеклоформ. Образцы имеют слоистое строение. Вблизи стеклоформирующей поверхности на глубине до 400 мкм формируется ультрадисперсная микроструктура с графитовыми пластинками размером 1...3 мкм. Затем в рабочем слое толщиной до 14 мм от стеклоформирующей поверхности размер графитовых включений возрастает до 35...40 мкм. Чугун имеет ферритную металлическую основу. Микротвердость чугуна вблизи стеклоформирующей поверхности и на расстоянии 14 мм от нее одинакова и составляет около  $205 \pm 5$  HV. На расстоянии 25 мм от стеклоформирующей поверхности микротвердость ниже ( $190 \pm 20$  HV). Размер графитовых пластинок достигает 200 мкм.

Благодаря более интенсивному охлаждению внутреннего слоя литой заготовки, при литье чугуна на холодильник существенно повышается дисперсность структурных составляющих на кромках рабочих поверхностей, что должно положительно сказаться как на теплостойкости, так и на износостойкости изделия. Получение литой заготовки в процессе затвердевания отливки с максимальным тепловым градиентом является весьма перспективным направлением при изготовлении чугунных формокомплектов.

### **БЛАГОДАРНОСТИ**

Металлографические исследования выполнены с использованием оборудования научно-исследовательской лаборатории электронной микроскопии Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Медяник Н.Л., Чупрова Л.В., Куликова Т.М., Одуд З.З. Производство стекла и стеклянной тары. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2005. 163 с.
2. Леушин И.О., Чистяков Д.Г., Нищенков А.В. Анализ технологии производства стеклоформирующей оснастки на отечественных предприятиях // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2016. № 4 (115). С. 184–191.
3. Леушин И.О., Чистяков Д.Г. Влияние структурообразования и фазового состава чугунных отливок стеклоформ на эксплуатационные свойства готовых изделий // *Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия*. 2015. Т. 56. № 5. С. 19–23.
4. Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Измайлов В.В., Барчуков Д.А. Исследование триботехнических свойств поверхностей, полученных воздействием концентрированных потоков энергии. Тверь: ТвГТУ, 2022. 164 с.

5. Шлегель А.Н. Повышение стойкости рабочих кромок чугуновых стеклоформ на основе лазерного непрерывного упрочнения: дис. ... канд. техн. наук. Владимир. 2011. 185 с.

6. Раткевич Г.В., Ботянов Е.В., Лаврентьев Е.А. Растровая электронная микроскопия чугуна для стеклоформ // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Физика*. 2011. № 15. С. 44–50.

7. Леушин И.О., Зиновьев Ю.А., Чистяков Д.Г. Упрочняющие фазы чугуновых деталей стеклоформ с градиентной структурой литья // *Литье и металлургия*. 2014. № 1 (74). С. 62–68.

8. Orzol D. K., Roos C., Wondraczek L. Tribological investigations of the glass-to-metal contact during glass forming at an industrial scale // *International Journal of Applied Glass Science*. 2021. V. 12. № 3. P. 381–390.

9. Bartocha D., Janerka K., Suchoń J. Charge materials and technology of melt and structure of gray cast iron // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. V. 162. P. 465–470.

10. Rashidi A.M., Moshrefi-Torbati M. Effect of tempering conditions on the mechanical properties of ductile cast iron with dual matrix structure (DMS) // *Materials Letters*. 2000. V. 45. № 3-4. P. 203–207.

11. Karimi M. Structure of cast iron and its application in industry // *Journal of Engineering in Industrial Research*. 2023. V. 4. № 2. P. 77–85.

12. Александров М.В., Чистяков Д.Г. Формирование градиентной структуры в деталях стеклоформ из чугунов с различной морфологией графита // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2013. № 3 (100). С. 219–229.

**Для цитирования:** Смолякова И.А., Иванова А.И., Афанасьева Л.Е. Структурообразование чугуновых отливок стеклоформ // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 24–31.

## STRUCTURE FORMATION OF CAST IRON GLASS MOLD CASTINGS

I.A. SMOLYAKOVA<sup>1</sup>, Cand. Sc., A.I. IVANOVA<sup>2</sup>, Cand. Sc.,  
L.E. AFANASIEVA<sup>1</sup>, Cand. Sc.

<sup>1</sup>Tver State Technical University

22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ludmila.a@mail.ru

<sup>2</sup>Tver State University

33, Zhelyabova st., Tver, 170100, e-mail: alex.ivanova33@yandex.ru

The microstructure, chemical and phase composition of gray cast iron blanks for glass molds are investigated. The necessity of controlling the phase composition of cast iron and the formation of individual structural components in the process of layer-by-layer solidification of the casting is shown to ensure increased operational properties of the mold set parts operating under severe conditions of cyclic thermal loads and abrasive wear.

**Keywords:** glass mold, mold set, cast iron, phase composition, microstructure, microhardness, wear resistance.

Поступила в редакцию/received: 12.12.2024; после рецензирования/revised: 20.12.2024;  
принята/accepted: 23.12.2024

# НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

УДК 622.331:662.64

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТОРФЯНОГО КУСКА ТРУБЧАТОЙ ФОРМЫ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук

Тверской государственной технической университет,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: alvovich@mail.ru

© Яблонев А.Л., 2025

Трубчатая форма кускового торфа по праву считается наиболее перспективной, поскольку обладает большей площадью испарения влаги, лучше поджигается и стабильнее горит в твердотопливных котлах. Такой кусок характеризуется такими параметрами, как наружный диаметр, внутренний диаметр, длина. Естественно, что возникают вопросы о параметрах, которые можно назвать рациональными, или оптимальными по критериям прочности на изгиб, технологичности и равномерности сушки. В данной статье сделана попытка ответить на поставленные вопросы теоретически. Приведены рекомендуемые рациональные соотношения диаметров и сами диаметры торфяных кусков. Отмечено, что предполагается необходимая экспериментальная проверка полученных результатов в лабораторных условиях.

*Ключевые слова:* кусковой торф, прочность на изгиб, трубчатая форма поперечного сечения куска, изгибающий момент, толщина стенки куска, время сушки куска, разрушающая нагрузка.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-32-39**

### ВВЕДЕНИЕ

Добыча кускового торфа является ярким примером внутрирегионального получения твердого местного коммунального (коммунально-бытового) топлива [1, 2]. Транспортное плечо от полей добычи до потребителей редко превышает 100 км и в большинстве случаев ограничивается 30-километровой зоной. Средняя теплотворная способность у кускового торфа с содержанием влаги 33 % составляет 13,2 МДж/кг против 10 МДж/кг у дров с содержанием влаги 25...30 % и 12,47 МДж/кг у подмосковного бурого угля, а низшая рабочая теплота сгорания в среднем равна 11,7 МДж/кг [3], что говорит о весьма высокой эффективности кускового торфа.

Теплотворная способность торфа обеспечивается его плотностью, а на плотность влияют в основном режимы работы добычных машин [4]. Объемная усадка куска, происходящая при испарении влаги, способствует повышению плотности [5, 6]. Последнее способствует уменьшению крошимости, повышению прочности, а следовательно, снижению потерь торфа при технологическом цикле добычи [7]. Нормальной плотностью, обеспечивающей необходимую теплотворную способность, считается 750...1 100 кг/м<sup>3</sup>. В работах [8, 9] показано, что поскольку основные производственные операции при добыче куска связаны с изгибными деформациями, то прочность на изгиб и должна быть тем параметром, который гарантирует сохраняемость торфа. Была проведена серия экспериментов по лабораторному формованию (рис. 1) и исследованию кускового торфа, в ходе которых разработан специальный стенд по оценке

изгибной прочности кускового торфа [10–12]. Однако предложенная методика касалась испытания лишь образцов круглого и прямоугольного сечения.



Рис. 1. Формование кускового торфа цилиндрического сечения на шнековом прессе

Анализ современной производственной практики показал, что наряду с круглым и прямоугольным сечением получили развитие трапецеидальное, квадратно-пустотелое и трубчатое сечения куска [13]. Наиболее перспективным следует считать именно трубчатое сечение, поскольку такой кусок имеет большую площадь поверхности, а значит, быстрее и интенсивнее сохнет и, кроме того, легче загорается и стабильнее горит в твердотопливных котлах. Однако вопросом остается рациональное соотношение наружного  $D$  и внутреннего  $d$  диаметров трубчатого куска по ряду критериев, а также их значения. Поэтому цель данной статьи – попытаться теоретически осветить этот аспект с позиций прочности куска, технологичности его производства и интенсивности сушки.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Трубчатая форма куска, хотя и не является новой, однако еще не получила широкого распространения. В конце 1980-х годов Всесоюзным научно-исследовательским институтом торфяной промышленности был разработан, создан и испытан проект машины для добычи, формования и выстилки кускового торфа трубчатой формы [14]. Причем выстилка производилась не «внаброс» и не прямыми лентами, как принято, а с переворотом и установкой куска наружным диаметром  $D = 160$  мм, внутренним  $d = 100$  мм и длиной  $l \approx 250$  мм в вертикальное положение. Данная конструкция не дошла до стадии серийного изготовления из-за внедрения рыночной экономики, хотя именно для нее и планировалась [13]. По сохранившимся фотографиям, сделанным в ходе испытаний, все же можно судить о том, что надежность метода установки куска в вертикальное положение была далека от 100 %. Значительные части высланных кусков находились либо в горизонтальном, либо сильно наклоненном положении. Автором работы было отмечено, что с уменьшением диаметра куска происходит снижение первого критического влагосодержания во время сушки и увеличение постоянного периода сушки. Увеличение диаметра (размера) куска снижает влияние осадков на процесс сушки. Однако существенное увеличение диаметра куска приводит к повышению общей продолжительности цикла за счет

возрастания убывающего периода сушки [14]. Налицо задача оптимизации, рассматривать и решать которую можно и нужно как теоретически, так и экспериментально.

Данное исследование получило развитие в последующем. Так, в работах [15–19] предлагается с помощью стилочной машины выстилать вертикально стоящий кусок трубчатой формы с параметрами  $D = 180$  мм,  $d = 100$  мм и  $l = 250$  мм. При этом конструкция машины включает составной мундштук с обратным букелем (для постепенного снятия внутренних напряжений в куске). Показано, что вертикальное расположение куска позволяет более рационально использовать при сушке энергию обдувающего ветра. Запатентован механизм установки куска в вертикальное положение, произведен анализ напряженно-деформированного состояния куска в процессе его изгиба при выходе из мундштука и перевороте. Проведена серия экспериментов на физической модели шнекового пресса, изготовленного по всем известным правилам и нормам [20, 21]. Однако прочностные свойства куска после окончания сушки не исследованы.

Поскольку работы [10, 11] содержат подробное описание устройства стенда для испытания формованной торфяной продукции на изгибную прочность, не будем здесь приводить всю методику досконально. Отметим лишь, что напряжения изгиба определяется по известной формуле [22]:

$$\sigma_{и} = \frac{M_{и\ max}}{W_x}, \quad (1)$$

где  $M_{и\ max}$  – максимальное значение изгибающего момента, действующего по всей длине  $L$  образца, которое достигается в точке приложения нагрузки (посередине между опорами);  $W_x$  – момент сопротивления сечения образца.

В работах [10, 11] также получено выражение для определения максимального изгибающего момента:

$$M_{и\ max} = 0,25FL, \quad (2)$$

где  $F$  – приложенная разрушающая нагрузка;  $L$  – расстояние между установочными опорами стенда.

В статье [13] по материалам источника [23] представлена формула для оценки момента сопротивления трубчатого (кольцевого сечения) образца:

$$W_{x\ \text{труб}} = \frac{\pi D^3}{32} \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right], \quad (3)$$

а также получена формула для оценки на стенде напряжения изгиба образца:

$$\sigma_{и\ \text{труб}} = \frac{8FL}{\pi D^3 \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^4 \right]} \leq [\sigma_{и}], \quad (4)$$

где  $[\sigma_{и}]$  – допускаемое напряжение при изгибе образца кускового торфа, которое может быть принято равным 3,5...4,5 МПа [3, 10, 11].

Анализ простой формулы (1) позволяет сделать вывод, что при одинаковом максимальном изгибающем моменте  $M_{и\ max}$  напряжения изгиба будут больше у того образца, у которого меньше момент сопротивления изгибу  $W_x$ . Из того, что изгибающий момент создается разрушающей нагрузкой  $F$  и расстоянием между опорами  $L$  (а они для сравниваемых условий должны быть одинаковыми), вытекает следующий, не менее простой вывод о том, что при одинаковой разрушающей нагрузке напряжения на

изгиб будут меньше в том образце, у которого больше момент сопротивления. Для теоретического исследования изменения момента сопротивления образцов кускового торфа в зависимости от соотношения диаметров  $d/D$  был произведен расчет, приведенный в табл. 1. Результаты расчета теоретических зависимостей  $W_x = f(d/D)$  наглядно продемонстрированы на рис. 2.

Таблица 1. Расчет моментов сопротивления сечения трубчатого кускового торфа  $W_x$  в зависимости от соотношения внутреннего и наружного диаметров  $d/D$

$D$ , мм	$d$ , мм	$d/D$	$1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4$	$W_x \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup>	$D$ , мм	$d$ , мм	$d/D$	$1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4$	$W_x \cdot 10^6$ , м <sup>3</sup>
60	6	0,1	0,999 9	21,204	140	14	0,1	0,999 9	269,364
	12	0,2	0,998 4	21,166		28	0,2	0,998 4	268,879
	18	0,3	0,991 9	21,034		42	0,3	0,991 9	267,209
	24	0,4	0,974 4	20,727		56	0,4	0,974 4	262,495
	30	0,5	0,937 5	19,881		7	0,5	0,937 5	252,554
	36	0,6	0,870 4	18,458		84	0,6	0,870 4	234,478
	42	0,7	0,759 9	16,114		98	0,7	0,759 9	204,710
	56	0,8	0,590 4	12,520		112	0,8	0,590 4	159,048
	54	0,9	0,343 9	7,293		126	0,9	0,343 9	92,644
80	8	0,1	0,999 9	50,260	160	16	0,1	0,999 9	402,084
	16	0,2	0,998 4	50,185		32	0,2	0,998 4	401,360
	24	0,3	0,991 9	49,858		48	0,3	0,991 9	398,867
	32	0,4	0,974 4	48,858		64	0,4	0,974 4	391,830
	40	0,5	0,937 5	47,123		80	0,5	0,937 5	376,991
	48	0,6	0,870 4	43,751		96	0,6	0,870 4	350,009
	56	0,7	0,759 9	38,196		112	0,7	0,759 9	305,574
	64	0,8	0,590 4	29,676		128	0,8	0,590 4	237,414
	72	0,9	0,343 9	17,286		144	0,9	0,343 9	138,290
100	10	0,1	0,999 9	98,165	180	18	0,1	0,999 9	572,498
	20	0,2	0,998 4	98,018		36	0,2	0,998 4	571,467
	30	0,3	0,991 9	97,380		54	0,3	0,991 9	567,917
	40	0,4	0,974 4	95,662		72	0,4	0,974 4	557,898
	50	0,5	0,937 5	92,039		90	0,5	0,937 5	536,770
	60	0,6	0,870 4	85,452		108	0,6	0,870 4	498,352
	70	0,7	0,759 9	74,603		126	0,7	0,759 9	435,085
	80	0,8	0,590 4	57,963		144	0,8	0,590 4	338,036
	90	0,9	0,343 9	33,762		162	0,9	0,343 9	196,902
120	12	0,1	0,999 9	169,629	200	20	0,1	0,999 9	785,319
	24	0,2	0,998 4	169,375		40	0,2	0,998 4	783,906
	36	0,3	0,991 9	168,272		60	0,3	0,991 9	779,036
	48	0,4	0,974 4	165,303		80	0,4	0,974 4	767,648
	60	0,5	0,937 5	159,043		100	0,5	0,937 5	736,311
	72	0,6	0,870 4	147,660		120	0,6	0,870 4	683,610
	84	0,7	0,759 9	128,914		140	0,7	0,759 9	596,824
	96	0,8	0,590 4	100,159		160	0,8	0,590 4	463,699
	108	0,9	0,343 9	58,341		180	0,9	0,3439	270,098

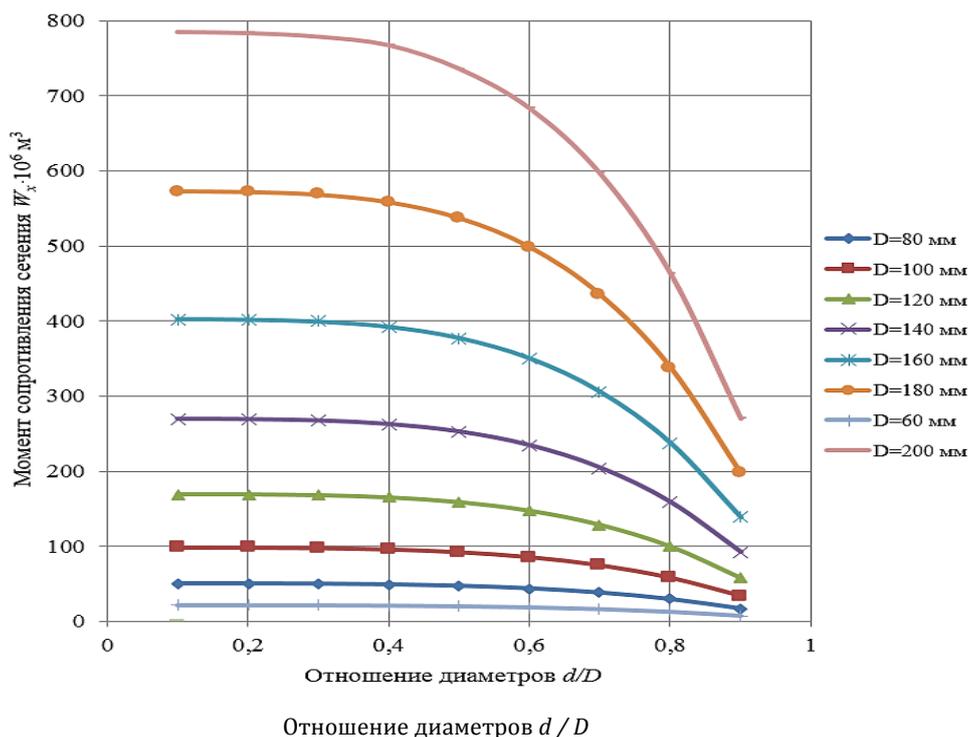


Рис. 2. Зависимость момента сопротивления трубчатого кускового торфа от соотношения внутреннего и наружного диаметров

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ полученных зависимостей (см. рис. 2) позволяет сделать следующие выводы. Очевидно, что должны быть отброшены ряды с  $d/D = 0,9$  и  $d/D = 0,1$  как невозможные в изготовлении из-за весьма низкой прочности куска (по сути, торфяной кусок с  $d/D = 0,9$  можно представить даже не как кольцо или трубу, а как тонкостенную оболочку, прочность которой явно недостаточна) и из-за весьма низкой прочности внутреннего стержня в мундштуке, служащего для пустообразования (для  $d/D = 0,1$ ). В рядах с  $d/D = 0,2 \dots 0,8$  четко прослеживается увеличение интенсивности падения момента сопротивления сечения при  $d/D > 0,4$ . Поэтому, по соображениям прочности на изгиб, не имеет смысла проектировать механизмы, формирующие трубчатые куски с соотношением диаметров  $d/D > 0,4$ . Следует ограничиться зоной  $0,2 \leq d/D \leq 0,4$ .

В работе [24] методом множителей Лагранжа установлено, что лучшим с технологической точки зрения является круглое сечение торфяного куска, а из условия минимума боковой поверхности при заданном объеме куска получено, что длина куска должна быть равна диаметру. При этом для полнотелого брикета из штемпельного пресса Б-8232 рекомендована высота 60...70 мм.

В монографии [25] показано, что для равномерности протекания процессов сушки в полевых условиях, когда испарение происходит из всего объема куска, диаметр последнего должен быть равен 30...40 мм.

В обоих случаях размер диаметра куска можно трактовать, как толщину стенки. Можно сделать вывод о том, что с позиций равномерного испарения влаги и технологичности толщина стенки куска трубчатого сечения должна быть равна 40...60 мм.

Принимая во внимание, что  $b$  (толщина стенки куска) рассчитывается по формуле

$$b = \frac{D-d}{2}, \quad (5)$$

а  $0,2 \leq d/D \leq 0,4$  (как это было выяснено ранее), можно составить таблицу рекомендуемых размеров куска, исходя из требований прочности на изгиб, технологичности и равномерности сушки (табл. 2).

Таблица 2. Рекомендуемые размеры куска формованного торфа

$b$ , мм	$d/D$	$D$ , мм	$d$ , мм
40	0,2	100,0	20,0
	0,3	114,3	34,3
	0,4	133,3	40,0
50	0,2	125,0	25,0
	0,3	142,9	42,9
	0,4	166,7	66,7
60	0,2	150,0	30,0
	0,3	171,4	51,4
	0,4	200,0	80,0

Теоретически полученные рациональные соотношения диаметров и их точные значения требуют дальнейшей экспериментальной проверки качества формования, которую предстоит выполнить в лабораторных условиях.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате работы были теоретически обоснованы рациональные соотношения диаметров и получены их значения для торфяного куска трубчатой формы. При этом учитывались следующие требования: прочность куска на изгиб, технологичность и равномерность сушки в полевых условиях. Данное исследование является лишь частью большой работы по научному обоснованию параметров торфяного куска трубчатой формы и режимов его формования, которая будет продолжена.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Misnikov O. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries // *E3S Web of Conferences «III-d International Innovative Mining Symposium»*. 2018. V. 41. P. 01046.
2. Панов В.В., Мисников О.С., Купорова А.В. Проблемы и перспективы развития торфяного производства в Российской Федерации // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 5. С. 105–117.
3. Справочник по торфу / И.Ф. Ларгин, С.С. Корчунов, Л.М. Малков [и др.]; редкол.: А.В. Лазарев, С.С. Корчунов (науч. редакторы) [и др.]. М.: Недра, 1982. 760 с.
4. Терентьев А.А., Суворов В.И. Структура и свойства формованной торфяной продукции. Тверь: Созвездие, 2004. 136 с.
5. Булышко М.Г., Иванов В.Н., Сарматов М.И. Брикетирование торфа. М.: Госэнергоиздат, 1962. 303 с.
6. Семенский Е.П. Технический анализ торфа. М.: Недра, 1966. 232 с.

7. Kremcheev E.A., Kremcheeva D.A. Technological Approaches to Reducing the Loss of Peat Raw Materials in Fields with Hydrological Regime // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016. V. 9. № 12. P. 89525.
8. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение энергоемкости процесса формирования кускового торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 1 (1). С. 36–45.
9. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Экспериментальное обоснование рациональных режимов производства кускового торфа // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 2. С. 163–171.
10. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Анализ параметров и режимов работы формующего агрегата машин для добычи кускового торфа с позиции обеспечения качества получаемого продукта // *Горный журнал*. 2022. № 5. С. 52–57.
11. Яблонев А.Л., Гусева А.М. Определение прочности на изгиб формованной торфяной продукции // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 3 (3). С. 47–55.
12. Yablonev A., Guseva A. Method of Expanding Measurement Limits of Digital Dynamometer in Testing Strength of Moulded Peat Products // *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. 2020. V. 174. P. 01035.
13. Яблонев А.Л. Формы сечений кускового торфа и его прочность на изгиб // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 29–36.
14. Селеннов В.Г., Петров Ю.О., Юрков В.М. Нереализованные разработки института // *Торф и Бизнес*. 2006. № 3 (5). С. 23–27.
15. Федоров А.С. Обоснование и выбор параметров формователя окускованного торфа трубчатого типа шнекового пресса стилочной машины: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2021. 195 с.
16. Федоров А.С., Казаков Ю.В., Фадеев Д.В. Параметры мундштука шнекового пресса с учетом требований к торфяной формованной продукции // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № S9. С. 3–15.
17. Федоров А.С., Михайлов А.В., Гарифуллин Д.Р. Механическая переработка торфяного сырья при формовании в составном мундштуке шнекового пресса // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020. № S44. С. 3–13.
18. Михайлов А.В., Федоров А.С. Анализ условий полевого производства окускованной торфяной продукции // *Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Материалы международной научно-практ. конф.* СПб.: СПбФ НИЦ МС, 2018. № 1. С. 146–147.
19. Михайлов А.В., Федоров А.С. Направления интенсификации сушки торфяной окускованной продукции в полевых условиях // *Автоматизированное проектирование в машиностроении*. 2018. № 6. С. 6–8.
20. Тимофеева Д.В., Попов В.П., Антимонов С.В., Зинюхина А.Г. Разработка конструкции шнека типового пресс-экструдера // *Вестник ОГУ*. 2014. № 9. С. 220–225.
21. Соколов М.В., Клинков А.С., Ефремов О.В., Беляев П.С., Однолько В.Г. Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин: монография. М.: Машиностроение-1, 2004. 248 с.
22. Степин П.А. Сопrotивление материалов. М.: Высшая школа, 1988. 367 с.
23. Таблица. Изгиб. Осевые моменты инерции сечений (статические моменты сечений), осевые сопротивления и радиусы инерции плоских фигур. URL:

<https://dpva.xyz/Guide/GuideMatherials/MaterialsResistant/MomentsOfInertion/> (дата обращения: 14.08.2024).

24. Богатов Б.А. Управление процессом разработки торфяных месторождений. Монография. Мн.: Высшэйшая школа, 1985. 168 с.

25. Афанасьев А.Е., Чураев Н.В. Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства: монография. М.: Недра, 1992. 288 с.

**Для цитирования:** Яблонев А.Л. Теоретическое обоснование рациональных параметров торфяного куска трубчатой формы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 1 (25). С. 32–39.

## **THEORETICAL JUSTIFICATION OF RATIONAL PARAMETERS OF A TUBULAR SOD PEAT**

A.L. YABLONEV, Dr. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: alvovich@mail.ru

The tubular form of sod peat is rightfully considered the most promising, since it has a larger moisture evaporation area, ignites better and burns more stably in solid fuel boilers. Such sod is characterized by such parameters as the outer diameter, inner diameter, length. Naturally, questions arise about the parameters, that can be called rational or optimal, according to the criteria of bending strength, manufacturability and uniformity of drying. This article attempts to answer these questions theoretically. Recommended rational ratios of diameters and the diameters of peat pieces themselves are given. It is noted, that the necessary experimental verification of the obtained results in laboratory conditions is assumed.

*Keywords:* sod peat, bending strength, tubular cross-sectional shape of the sod, bending moment, wall thickness of the sod, drying time of the sod, breaking load.

Поступила в редакцию/received: 16.11.2024; после рецензирования/ revised: 27.11.2024;  
принята/accepted: 12.12.2024

УДК 622.332: 622.271.45

## **ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БУРОГО УГЛЯ**

Л.В. ЛОБАЧЕВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: firslud@mail.ru

© Лобачева Л.В., 2025

Рассмотрены основные подходы к разработке геотехнологий комплексного освоения техногенных месторождений добычи бурого угля. Обоснованы технологические принципы комплексного освоения месторождений бурого угля. Представлены

результаты исследования техногенного сырья на содержание тяжелых металлов и уровень кислотности. Показано, что решение проблемы состоит в комплексном подходе к изучению и созданию геотехнологий переработки отходов добычи бурого угля и экстракции полезных компонентов отходов его добычи. Предложены технологическая схема и технические решения по получению и использованию продуктов извлечения отходов производства.

*Ключевые слова:* бурый уголь, отходы, техногенное месторождение, экстракция, комплексное освоение месторождений, полезные компоненты, минерально-сырьевая база, отвал.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-39-47**

## **ВВЕДЕНИЕ**

В горной промышленности рациональное комплексное освоение недр является важным критерием не только получения оптимальных технико-экономических параметров разработки угольных месторождений с максимальными показателями использования добываемой горной массы, но и интеграции в эксплуатацию ранее образованных техногенных массивов, формируемых из отходов производства [1–4].

Многолетнее освоение угольных месторождений обусловило значительное сокращение и снижение качества балансов запасов, а также привело к формированию техногенных месторождений, приобретающих в настоящее время особое значение [1, 2, 5].

Техногенные месторождения представляют собой массивы техногенного минерального сырья, образованные в результате его складирования или размещения на поверхности, под землей, водой и пригодные для эффективного промышленного использования. Комплексное освоение недр, в частности техногенных месторождений, помимо экономического значения представляет и экологический интерес, поскольку их разработка способствует сохранению недр, восстановлению земельных ресурсов и повышает уровень экологической безопасности в местах расположения горнодобывающих предприятий [6].

Актуальность и необходимость решения проблемы снижения объемов отходов горнодобывающих предприятий, их эффективной переработки и использования определяется целями и задачами Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года, предполагающей «создание условий для освоения техногенных месторождений, извлечение ценных компонентов из вскрышных, вмещающих пород, а также попутных промышленных вод», а также Стратегией развития промышленности России по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года [5]. Комплексное освоение угольных и техногенных месторождений обеспечит необходимые условия для увеличения минерально-сырьевой базы и создания горнопромышленных комплексов с расширенным циклом добычи руды и утилизации отходов [1–3, 5–9].

В связи с вышеперечисленным цель статьи состоит в обосновании технологии комплексного освоения техногенных месторождений добычи бурого угля, способствующей устойчивому развитию горнопромышленного производства.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Разработка современных технологий комплексного освоения техногенных месторождений базируется на геологической, гидрогеологической и геотехнологической их изученности, более тщательной оценке и соблюдении технологических режимов эксплуатации отвалов.

Объектом исследования является техногенное месторождение отходов бурого угля, расположенное в Нелидовском районе Тверской области. Нелидовское месторождение относится к Подмосковному буроугольному бассейну, с общим количеством балансовых запасов 65,728 млн т угля. Песчано-глинистая угленосная толща нижнего карбона имеет мощность около 50 м, подстиляется и перекрывается карбонатными отложениями. Отложения верхнего девона (вскрытая мощность до 40 м) представлены доломитами, доломитизированными известняками и подстилающими их глинами с прослоями песка и песчаника. Четвертичные отложения, представленные преимущественно валунными глинами, имеют мощность 10...30 м, возрастающую в погребенных дочетвертичных долинах до 500 м при глубине 75...80 м. В районе прослеживается тектонический прогиб отложений с амплитудой до 40...60 м. На Нелидовском месторождении разведочными скважинами выявлены гляционарушения с амплитудой от 10 до 21 м [11].

Экспериментальное исследование включало два этапа, на которых оценивалось состояние и уровень изменений техногенного массива Нелидовского месторождения, проводился почвенный анализ техногенного сырья. Образцы грунта породного отвала отбирались на предмет определения тяжелых металлов по стандартной методике [13–15] и показателя кислотности почвенной среды с помощью электронного анализатора уровня рН.

Отвальные отходы, складываемые в течение длительного периода, со временем изменяют свои свойства, поэтому знание динамики этого процесса оказывает определяющее влияние на выбор технологии промышленной эксплуатации техногенного сырья. В качестве интегрального показателя состояния отвальных отходов можно использовать функцию распределения концентрации  $j$ -го ингредиента ( $C_j$ ). В случае фазового пространства  $(t, \tau)$ , где  $\tau$  – период сохранения концентрации  $j$ -го ингредиента, применимо следующее уравнение [15]:

$$\frac{\partial C_j}{\partial t} + \frac{\partial C_j}{\partial \tau} = -k_j C_j.$$

С учетом условий формирования техногенных массивов краевые условия представленного уравнения имеют вид:

$$C_j(0, \tau) = C_{j0} = \text{const}; \quad C_j(t, 0) = C_{jn} = \text{const},$$

где  $C_{j0}$ ,  $C_{jn}$  – распределение концентрации  $j$ -го ингредиента в начальный момент времени (в момент его образования) и в момент времени, соответствующий началу складирования.

Решение уравнения имеет следующий вид [15]:

$$C_j(t, \tau) = \begin{cases} C_{j0} \exp(-k_j t) & \text{при } 0 \leq t \leq \tau \\ C_{jn} \exp(-k_j \tau) & \text{при } t > \tau \end{cases}.$$

На втором этапе проводился анализ возможности использования полезных компонентов техногенного сырья.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для обоснования технологии комплексного освоения техногенных месторождений были проанализированы данные об условиях формирования, складирования и хранения отвальных отходов.

На шахтах Нелидовского месторождения бурого угля для транспортирования породы на отвал преимущественно использовались канатная откатка скипами или вагонетками по рельсовым путям, в результате чего образовались отвалы конической формы (рис. 1). По условиям хранения отходы относятся к категории «лежалые», т.е. они хранились в течение определенного времени и подверглись процессам вторичного минералообразования и изменению структуры массива [1, 16]. Техногенные массивы расположены близко к производству (шахте), для каждой шахты был создан свой отвал. Формирование исследуемого техногенного массива проводилось по технологии слоистого строения отвала. В разные периоды эксплуатации отсыпались неоднородные по свойствам (крупности кусков, их составу, влажности и т.д.) порции техногенного сырья. Слои с более крупными кусками породы чередуются со слоями мелочи (рис. 2).



Рис. 1. Техногенное месторождение Нелидовских шахт



Рис. 2. Породные отходы Нелидовского техногенного месторождения

Пласты, включающие обогащенные углем крупнообломочные куски, подвергались более интенсивному горению и представляют собой слои спекшихся кусков горелых пород. Включения, сложенные рыхлыми породами, горели менее интенсивно.

После отсыпки отвальной породы за счет процессов горения техногенного массива в атмосферный воздух выделяется диоксид серы, а при взаимодействии с атмосферными водами – сернистая кислота:



В техногенных месторождениях сернистая кислота существует только в водных растворах, поэтому при взаимодействии ее с кислородом воздуха образуется серная кислота:



Серная кислота вступает в химические реакции с отвальной породой, что приводит к образованию химически активных водорастворимых соединений, в том числе кислоторастворимых соединений тяжелых металлов. Поэтому уровень кислотности породной массы и содержание в ней тяжелых металлов являются важными характеристиками, определяющими направленность использования отходов добычи угля [17].

Отбор проб проводился на разных уровнях техногенного массива Нелидовского бурого угля месторождения [16]. Результаты определения тяжелых металлов и уровня кислотности исследуемого техногенного сырья приведены в таблице.

Значение рН и содержание тяжелых металлов в отвальной породе, мг/кг

Номер образца	Zn	Cd	Cu	Sr	Mn	рН
1	24,7	12,4	11,3	22,1	27,5	2,4
2	23,2	10,1	9,7	34,8	38,3	2,8
3	26,8	4,5	8,8	27,6	29,1	3,1
4	21,4	8,6	12,5	19,2	10,3	2,4

Высокая кислотность отвальной породы, о которой свидетельствуют результаты исследования, способствует выщелачиванию техногенных месторождений. Содержание тяжелых металлов практически не превышает нормативных значений, что подтверждает влияние уровня кислотности на подвижность компонентов отвала.

Поскольку техногенный массив Нелидовского месторождения бурого угля создавался как хранилище отходов производства, дальнейшее использование которых не предполагалось, не были учтены процессы обрушения, а также не были приняты меры по управлению деформацией отвала. Такой подход на современном этапе развития геотехнологии освоения недр считается нерациональным.

Результаты исследования динамики распределения физико-химических свойств ингредиентов отвальной массы представлены на рис. 3. Для упрощения оценки данных эксперимента введены следующие обозначения:  $P_j = C_j / C_{j0}$ ,  $\Psi = t / \tau$ .

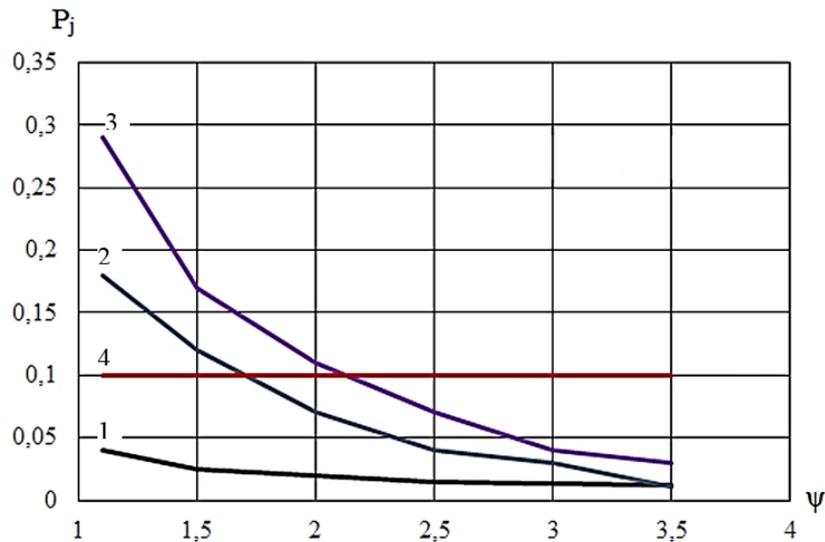


Рис. 3. Динамика распределения  $j$ -го ингредиента техногенного сырья при отношении  $C_j / C_{j0}$ , равном: 1 – 0,8; 2 – 0,5; 3 – 0,1; 4 – предельно допустимому значению

Анализ полученных данных свидетельствует, что распределение средних значений физико-химических свойств техногенного сырья при их размещении на земной поверхности изменяется до некоторого фиксированного значения, численно равного  $C_{jn} \exp(-k_j \tau)$ .

Технологическая схема освоения техногенного месторождения, относящегося к длительно лежалым, должна предусматривать валовую выемку сырья механизированными комплексами, транспортирование добытого сырья на участок переработки и дальнейшего использования.

На базе теоретических и экспериментальных исследований отечественных специалистов по созданию технологий эффективной переработки отходов добычи бурого угля в качестве основных технических решений по использованию сырья Нелидовского техногенного месторождения можно предложить [6, 8, 15, 16, 19]:

- создание сырьевых смесей для изготовления автоклавных изделий;
- применение в качестве вяжущего компонента для изготовления бесцементных бетонных изделий;
- получение сырьевой смеси для теплоизоляционного гранулированного материала;
- выпуск сорбентов на основе гуматов на очистки сточных вод;
- производство гуминовых препаратов для целей сельскохозяйственного производства.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные на техногенном месторождении исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Выполнен анализ состояния Нелидовского техногенного месторождения для обоснования и выбора направления геотехнологии его комплексного освоения.
2. Исследование проб породной массы по показателю рН свидетельствует о высоком уровне кислотности ( $pH = 2,4-3,1$ ), что увеличивает подвижность компонентов отвальной породы.

3. Содержание тяжелых металлов в образцах техногенного сырья в целом не превышает нормативных значений, что подтверждает влияние кислотности породы на выщелачивание техногенных массивов.

4. Для оценки динамики распределения физико-химических свойств техногенного сырья применимо уравнение первого порядка в частных производных, решения которого позволяют провести прогноз состояния отвальной породы.

5. Предлагаемая технологическая схема освоения техногенного месторождения включает валовую выемку сырья механизированными комплексами, транспортирование добытого сырья на участок переработки и дальнейшего использования.

6. Отходы добычи бурого угля могут быть использованы в качестве продуктов в различных отраслях промышленности, востребованных на внутреннем рынке РФ.

Таким образом, эффективное освоение техногенных месторождений должно включать технологические процессы, направленные на повышение уровня и комплексности извлечения полезных компонентов за счет уменьшения их потерь в недрах, в процессах переработки и утилизации отходов производства.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Илимбетов А.Ф., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Разработка технологии формирования и комплексного освоения техногенных месторождений на основе отходов переработки руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2008. № 4. С. 247–256.

2. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Развитие теории проектирования и реализации идей комплексного освоения недр // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2008. № 4. С. 20–41.

3. Рыльникова М.В., Олизаренко В.В., Туркин И.С. Обоснование технологии и комплекса оборудования для ступенчатого обезвоживания техногенного сырья при комплексном освоении рудных месторождений // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. № 9. С. 62–69.

4. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Юн А.Б., Терентьева И.В. Становление нового технологического уклада комплексного освоения недр при истощении балансовых запасов месторождений // *Горный журнал*. 2019. № 4. С. 11–14.

5. Макаров А.Б., Хасанова Г.Г., Талалай А.Г. Техногенные месторождения: особенности исследования // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2019. Вып. 3 (55). С. 58–62.

6. Архипов, А.В. Техногенные месторождения. Разработка и формирование: монография. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. 175 с.

7. Захаров Е.И., Маликов А.А., Фридлиндер Г.В., Ганин М.П. Геотехнологии комплексного освоения угольных и техногенных месторождений Подмосковского угольного бассейна // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. Вып. 2. С. 238–247.

8. Качурин Н.М., Зоркин И.Е., Мосина Е.К. Геотехнология комплексного освоения месторождений бурого угля // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2013. Вып. 1. С. 119–130.

9. Чернегов Ю.А. Методы изучения и освоения техногенных месторождений // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2009. № 3. С. 371–375.

10. Киреева А.С. Современное состояние и экологическая оценка влияния породных отвалов предприятий угольной промышленности // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2022. Вып. 1. С. 62–71.

11. Геологическое описание Нелидово-Селижаровского угленосного района. URL: <https://industrial-wood.ru/geologiya-mestorozhdeniy-uglya/15669-geologicheskoe-opisanie-nelidovo-selizharovskogo-uglenosnogo-rayona.html> (дата обращения: 10.11.2024).

12. ГОСТ Р 59248-2020. Угли бурые, каменные, антрацит, горячие сланцы и угольные брикеты. Методы отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний. М.: Стандартинформ, 2021. 12 с.

13. ГОСТ Р 55660-2013. Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ. М.: Стандартинформ, 2019. 14 с.

14. ПНД Ф 12.1:2.2:2.3.2-03. Отбор проб почв, грунтов, осадков биологических очистных сооружений, шламов промышленных сточных вод, донных отложений искусственно созданных водоемов, прудов-накопителей и гидротехнических сооружений. М.: ФБУ «ФЦАО», 2014. 14 с.

15. Ефимов В.И., Факторович В.В., Рыбак В.Л., Мосина Е.К. Экологическая безопасность комплексного освоения угольных и техногенных месторождений // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2015. Вып. 3. С. 3–14.

16. Лобачева Л.В., Левинский В.В. Исследование воздействия отходов добычи бурого угля на окружающую среду // *Экология и безопасность жизнедеятельности: Сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции*. Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. С. 236–239.

17. Рыбак В.Л. Совершенствование методов прогноза переноса пыли, диффузии жидких и газообразных примесей в зонах действия породных отвалов угольных шахт: дис. ... канд. техн. наук. Тула, 2016. 172 с.

18. Арасланова Л.Х. Очистка сточных вод от ионов тяжелых металлов и нефтепродуктов сорбентами на основе промышленных отходов: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2023. 131 с.

19. Качурин Н.М., Ефимов В.И., Никулин И.Б. Принципы формирования эколого-экономической оценки использования отходов углеобогащения // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2016. № 3. С. 232–243.

**Для цитирования:** Лобачева Л.В. Обоснование технологии комплексного освоения техногенных месторождений бурого угля // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 39–47.

## JUSTIFICATION OF TECHNOLOGY FOR INTEGRATED DEVELOPMENT OF TECHNOGENIC BROWN COAL DEPOSITS

L.V. LOBACHEVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University  
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: firslud@mail.ru

The basic approaches for the development of geotechnologies of complex development of technogenic deposits of lignite coal production are considered. Technological principles of complex development of lignite deposits are substantiated. The results of

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 1 (25), 2025*

research of technogenic raw materials for the content of heavy metals and acidity level are presented. It is shown that the solution of the problem lies in an integrated approach to the study and creation of geotechnologies for processing of lignite mining waste and extraction of useful components of lignite mining waste. The technological scheme and technical solutions for obtaining and utilization of extraction products of mining waste are proposed.

*Keywords:* lignite coal, waste, technogenic deposit, extraction, integrated field development, useful components, mineral resource base, dump.

Поступила в редакцию/received: 12.12.2024; после рецензирования/reviced: 14.12.2024;  
принята/accepted: 17.12.2024

УДК 622.24.08

## **ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА КОЛИЧЕСТВО ОТКАЗОВ БУРОВЫХ СТАНКОВ СБШ-250**

М.Б. ХАМИДОВ, асп.

Университет науки и технологий МИСИС,  
119049, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1, e-mail: mukhammadkhamidoc@gmail.com

© Хамидов М.Б., 2025

На основе данных эксплуатации буровых станков СБШ-250 в период с 2013 по 2023 годы на карьере Кальмакыр установлена частота отказов для станков и их основных систем: мачты, ходовой тележки, редуктора, компрессора, гидросистемы. Показано, что количество отказов изменяется циклично в процессе эксплуатации станков, при этом их число для узлов незначительно варьируется у различных станков. Больше количество возникает в различные периоды от начала эксплуатации узлов, а максимальное приходится на компрессор и гидросистему. Учет цикличности отказов может быть использован при прогнозе производительности и расчете необходимого количества запасных частей.

*Ключевые слова:* буровой станок СБШ-250, открытые горные работы, отказ оборудования, надежность бурового оборудования, срок эксплуатации, анализ отказов.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-47-54**

### **ВВЕДЕНИЕ**

В Республике Узбекистан открытые горные работы занимают важное место в добыче полезных ископаемых и характеризуются активным использованием буровзрывных работ. Эти работы обеспечивают возможность проведения последующих операций по извлечению и транспортировке руды. Для бурения скважин под взрывные заряды наиболее широко распространены буровые станки модели СБШ-250, производимые ОАО «Рудгормаш» (рис. 1). Эксплуатация данного оборудования на протяжении продолжительного времени подчеркивает его значительную роль в обеспечении стабильной работы карьеров и эффективного использования ресурсов [1, 2].



Рис. 1. Буровой станок СБШ: 1 – мачта; 2 – гидроцилиндры; 3 – кабина машиниста; 4 – тележка (гусеничная); 5 – машинное отделение

Значительная доля затрат горнодобывающих предприятий, достигающая 30...40 % от общих расходов, приходится на буровзрывные работы, что отражает высокую зависимость себестоимости добычи полезных ископаемых от эффективности процессов бурения [3, 4]. При этом эксплуатация в тяжелых горно-геологических условиях неизбежно ведет к отказам и, соответственно, простоям оборудования и снижению производительности.

Для эффективного планирования производственных процессов и повышения надежности важно выявить основные закономерности, связывающие частоту и характер отказов со сроком эксплуатации.

В ряде работ показано, что с увеличением срока эксплуатации буровых станков наблюдается рост вероятности их отказов и снижение общей производительности [5, 6]. Согласно работам [7, 8] старение бурового оборудования приводит к ухудшению его эксплуатационных показателей, таких как мощность и скорость бурения. Техническое обслуживание может замедлить этот процесс, однако эффективность обслуживания со временем уменьшается, что также подтверждается данными по частоте отказов [9, 10]. В исследованиях [11, 12] внимание акцентируется на том, что на надежность буровых станков значительно влияют условия эксплуатации: работа в сложных геологических условиях ведет к ускоренному износу оборудования, в то время как более благоприятные условия способствуют меньшему уровню износа и большей надежности. Согласно данным, полученным в статье [13], возраст бурового оборудования коррелирует с увеличением частоты внеплановых ремонтов и затрат на техническое обслуживание. Рекомендовано внедрение систем управления состоянием, которые учитывают не только возраст, но и фактические условия эксплуатации и рабочие нагрузки. В источнике [14] используются методики оценки ресурса оборудования, основанные на математическом моделировании и анализе данных, собранных в процессе эксплуатации. Это позволяет заранее планировать замену узлов и компонентов, что снижает вероятность аварий и простоев. Модернизация и применение

новых технологий обслуживания буровых станков исследуются также в статье [15], авторы которой подчеркивают важность регулярного анализа состояния оборудования и адаптации планов обслуживания к фактическим условиям работы. В источнике [16] обоснована необходимость внедрения системы управления жизненным циклом оборудования, что поможет оптимизировать использование ресурсов и повысить надежность узлов в условиях постоянного их износа.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ БУРОВЫХ СТАНКОВ**

Использовались данные об отказах трех буровых станков СБШ-250, эксплуатировавшихся на карьере Кальмакыр Алмалыкского горно-металлургического комбината. Коэффициент крепости вскрышных пород и руды по шкале проф. М.М. Протодьяконова находился в диапазоне от 10 до 16.

Исследуемые станки работали на восточной части карьера, введены в эксплуатацию в 2013 году. Рассматриваемый период эксплуатации: с 2013 по 2023 годы. Для удобства изложения станкам присвоены номера 1, 2 и 3.

Анализ отказов и воздействий (FMEA – Failure Mode and Effect Analysis) – метод, используемый для систематической оценки всех возможных отказов компонентов бурового оборудования и определения их влияния на общую систему [17].

Метод Монте-Карло применяется для моделирования различных сценариев отказов компонентов и оценки их влияния на общую производительность оборудования.

Анализ жизненного цикла (LCCA – Life Cycle Cost Analysis) – метод, используемый для оценки всех затрат, связанных с оборудованием, на протяжении всего периода его эксплуатации.

Метод оценки оставшегося ресурса (RUL – Remaining Useful Life), основанный на анализе данных о фактических условиях эксплуатации, количестве отказов и проведенных ремонтах, применяется для прогнозирования остаточного ресурса оборудования.

Нейронные сети и искусственный интеллект – метод, позволяющий предсказывать неисправности на основе анализа данных.

В статье проанализирован показатель частоты отказов станков и их основных систем.

Применение существующих методов и показателей надежности буровых станков, включая частоту отказов в рассматриваемых горно-геологических условиях, позволит прогнозировать производительность и планировать приобретение запасных частей.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ**

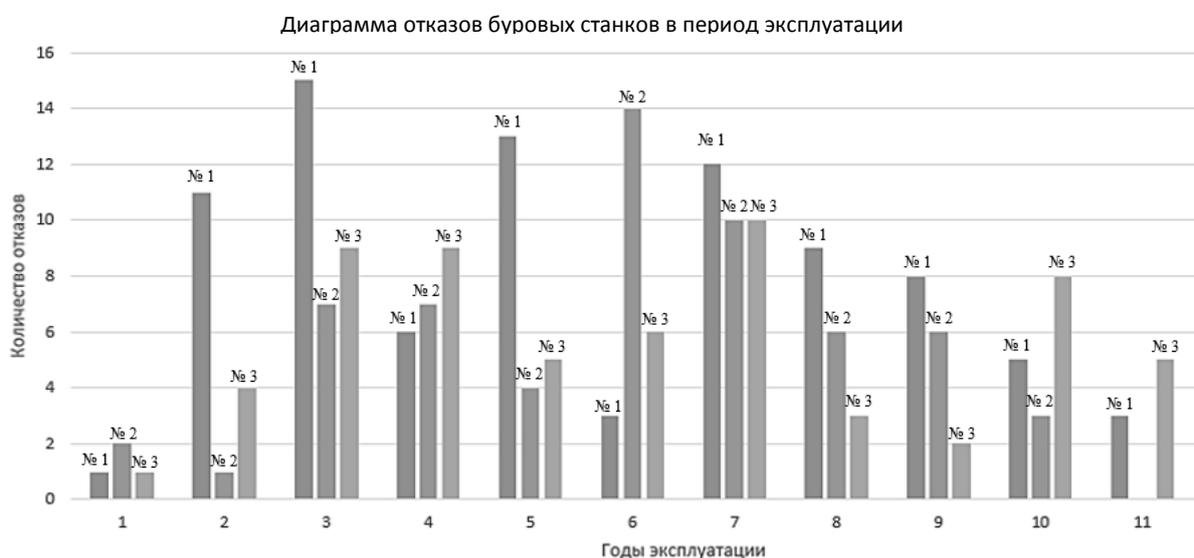
Количество отказов по годам эксплуатации оборудования приведено на рис. 2.

Общее количество отказов станка № 2 и станка № 3 оказалось примерно одинаковым (60 и 62 соответственно), тогда как у станка № 1 было 86 отказов, т.е. примерно на треть больше. Можно предположить, что это связано с бурением более крепкой породы, а также с техническим обслуживанием.

Из графиков на рис. 2 видно, что общее количество отказов имеет определенную цикличность, предположительно связанную с периодичностью замены узлов в зависимости от их исходного качества, условий эксплуатации и технического обслуживания.



(а)



(б)

Рис. 2. Количество отказов буровых станков:  
суммарное (а); с разделением по станкам № 1, 2, 3 (б)

Рассмотрим более подробно влияние узлов систем станка на надежность его работы. В табл. 1 представлено процентное соотношение отказов узлов и систем. Количество отказов узлов и систем станков за весь период наблюдения представлено на рис. 3.

Таблица 1. Соотношение отказов узлов и систем, %

Узлы	Станок № 1	Станок № 2	Станок № 3
Гидросистема	18,6	15,4	18,6
Компрессор	25,6	12,3	22
Мачта	15,2	26,1	15,2
Тележка	17,4	15,4	12
Редуктор хода	7	4,6	8,5
Другие	16,2	26,1	23,7

Соотношение отказов по узлам буровых станков № 1, 2, 3  
(от центра)

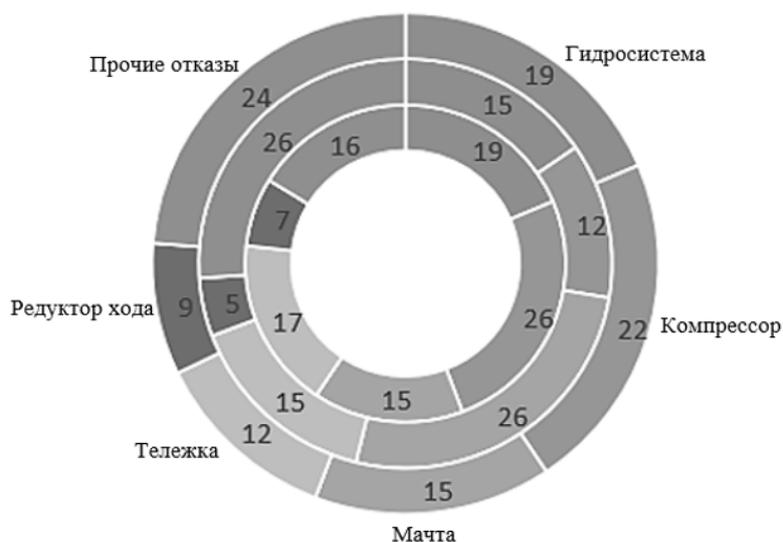


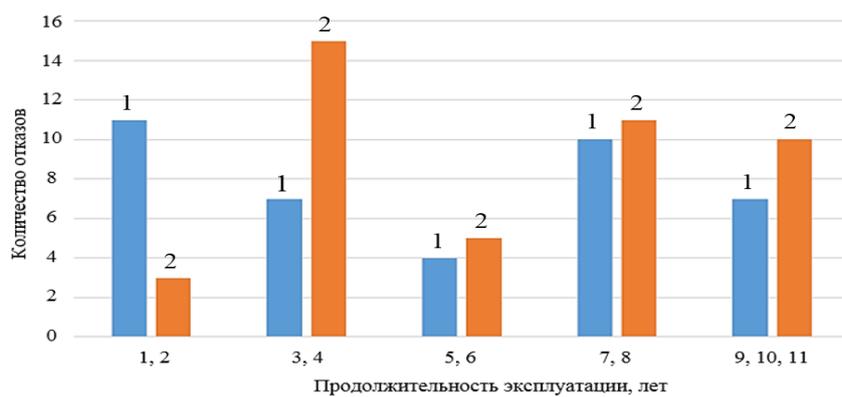
Рис. 3. Отказы узлов станков за все годы наблюдения

Таким образом, доли отказов различных узлов имеют примерно одинаковые пропорции, что облегчает расчет необходимого количества запасных частей.

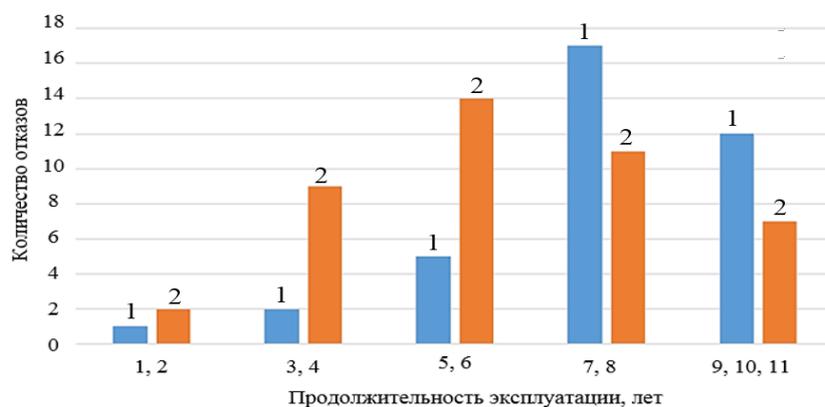
Количество отказов различных узлов по годам эксплуатации представлено в табл. 2. На рис. 4 приведено число отказов за весь период наблюдений.

Таблица 2. Количество отказов узлов по годам эксплуатации

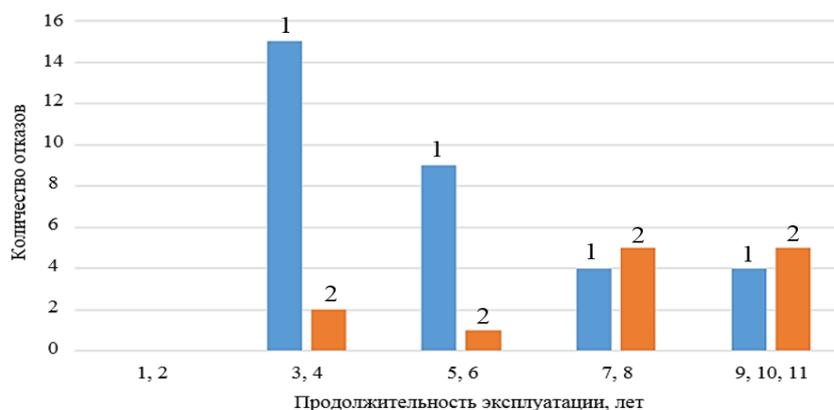
По годам	Гидро-система	Компрес-сор	Мачта	Тележка	Редуктор хода	Другие	Общее количество отказов
1	0	0	1	0	0	1	2
2	1	2	9	2	0	2	16
3	0	5	5	8	2	6	26
4	2	4	3	5	0	9	23
5	5	12	2	3	0	3	25
6	0	1	2	6	1	2	12
7	9	5	7	2	3	6	32
8	8	5	3	2	2	2	22
9	6	4	0	2	0	3	15
10	6	3	3	1	3	5	21
11	0	2	4	1	2	5	14
Всего	37	43	39	32	13	44	208



(а)



(б)



(в)

Рис. 4. Отказы узлов станков за весь период наблюдения: мачта – 1 и прочие отказы – 2 (а); гидросистема – 1 и компрессор – 2 (б); тележка – 1 и редуктор хода – 2 (в)

Из данных таблицы и гистограмм видно, что у части узлов (мачты, тележки и компрессора) отказы начинаются со 2...3-го года эксплуатации, у гидросистемы – с 5...7-го, а у редуктора хода – с 6...7-го года эксплуатации.

Можно сделать вывод о том, что количество отказов станков имеет определенные закономерности, при этом их увеличение в определенные периоды зависит от цикличности замены узлов, а явно выраженный рост общего количества отказов по мере эксплуатации оборудования отсутствует.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Общее количество отказов характеризуется определенной цикличностью, связанной, на наш взгляд, с периодичностью замены узлов в зависимости от их качества, условий эксплуатации и технического обслуживания.
2. Продолжительность эксплуатации не приводит к выраженному увеличению общего количества отказов станков с увеличением.
3. Доли отказов узлов у разных станков имеют примерно одинаковые пропорции.
4. У различных узлов большее количество отказов возникает в различные периоды от начала эксплуатации.
5. Наибольшее количество отказов приходится на компрессор и гидросистему (20 и 17 % соответственно).
6. Учет цикличности увеличения количества отказов позволит прогнозировать производительность и потребность в запасных частях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Подэрни Р.Ю. Механическое оборудование карьеров. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Горная книга (МГГУ), 2007. 680 с.
2. Рудоуправление «Кальмакыр». URL: <https://agmk.uz/ru/mining/rudoupravlenie-kalmarkur> (дата обращения: 16.12.2024).
3. Катанов Б.А. Карьерные буровые станки // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2007. № 5 С. 5–8.
4. Станок буровой шарошечный СБШ-250д для бурения взрывных скважин // *Горная промышленность*. 2011. № 6 (100). С. 30–31.
5. Чинзориг Б. Определение показателей надежности буровых станков в условиях ГОКа «ЭРДЭНЭТ» // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2005. № 8. С. 65–66.
6. Кантович Л.И., Дмитриев В.Н. Статика и динамика буровых шарошечных станков. М.: Недра, 1984. 201 с.
7. Контеев О.Ю., Худяков А.Г., Болкисева Ю.В., Болкисев В.С. Безопасность эксплуатации шарошечных карьерных буровых станков с истекшим сроком службы // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2009. № 10. С. 165–169.
8. Харьковская Н.П. Оценка эксплуатационной надежности шарошечных станков и долот с восстановлением // *Молодой ученый*. 2016. № 20 (124). С. 218–223.
9. Вержанский А.П., Островский М.С., Мнацаканян В.У. Современные технологии технического обслуживания и ремонта горных машин и оборудования // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. № S1. С. 422–449.
10. Клишин В.И., Герике Б.Л., Герике П.Б. Профилактическое обслуживание буровых станков: преимущества и перспективы // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2015. № 5 (111). С. 64–69.
11. Эгамбердиев И.П., Муминов Р.О., Саидов А.Н. Исследование повышения надежности карьерного бурового станка типа СБШ-250МНА-32 // *Горный вестник Узбекистана*. 2021. № 4. С. 95–97.
12. Бовин К.А., Гилев А.В., Шигин А.О., Плотников И.С. Анализ эксплуатации техники бурения взрывных скважин на карьерах Красноярского края и Республики Хакасии // *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2017. Т. 40. № 3 (60). С. 99–106.

13. Болкисев В.С., Сухов Р.И., Болкисева Ю.В. Вопросы определения продолжительности безопасной эксплуатации карьерных буровых станков после окончания установленного срока службы // *Горное оборудование и электромеханика*. 2014. № 6 (103). С. 33–37.

14. Досайкин В.М., Фенстер Д.Б., Порозов Д.И., Терентьев Е.А., Губанцев А.Н. К созданию прогностической модели оценки остаточного ресурса бурового карьерного оборудования // *Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения*. 2015. № 5 (18). С. 25–29.

15. Муминов Р.О., Райханова Г.Е., Кузиев Д.А. Повышение надежности и долговечности буровых станков за счет понижения динамических нагрузок // *Уголь*. 2021. № 5. С. 32–36.

16. Субботин С.А., Шутько Л.Г. Управление жизненным циклом как фактор повышения конкурентоспособности производителей горно-шахтного оборудования // *Сборник трудов XVI Международной научно-технической конференции «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС-2016»*. Кемерово: КузГТУ, 2016. С. 52.

17. Issar G., Navon L.R. Operational Excellence: A Concise Guide to Basic Concepts and Their Application. Springer, 2016.

18. Mikaeil R., Khoshalan H.A., Nasrollahi M.H. Esmaeilzadeh A. Reliability Analysis of Full-face Tunnel Boring Machines by Monte Carlo Simulation Technique // *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022. V. 37. № 3. P. 149–160.

**Для цитирования:** Хамидов М.Б. Влияние продолжительности эксплуатации на количество отказов буровых станков СБШ-250 // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 47–54.

## **INFLUENCE OF OPERATION DURATION ON THE NUMBER OF FAILURES OF DRILLING RIGS SBSH-250**

M.B. KHAMIDOV, Postgraduate

University of Science and Technology MISiS,  
Building 1, 4, Leninsky pr., Moscow, 119049, e-mail: mukhammadkhamidoc@gmail.com

Based on the data of operation of SBSH-250 drilling rigs in the period from 2013 to 2023 at the Kalmakyr quarry, the failure rate was established for the rigs and their main systems: mast, undercarriage, gearbox, compressor, hydraulic system. It is shown that the number of failures changes cyclically during the operation of the rigs, while their number for units varies slightly for different rigs. A greater number occurs at different periods from the start of operation of the units, and the maximum falls on the compressor and hydraulic system. Taking into account the cyclicity of failures can be used to predict productivity and calculate the required number of spare parts.

*Keywords:* Drilling rig SBSH-250, open pit mining, failures in drilling rigs, operational failures, operating time, studies of failures in drilling rigs.

Поступила в редакцию/received: 12.12.2024; после рецензирования/revised: 14.12.2024;  
принята/accepted: 17.12.2024

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 004.94:681.3

## ОПТИМИЗАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЕБАЛАНСИРОВКОЙ ИНВЕСТИЦИОННОГО ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ МНОГООБЪЕКТНОЙ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

И.М. БУХОЛЬЦЕВ<sup>1</sup>, асп., Н.А. РЫНДИН<sup>2</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup> Воронежский институт высоких технологий,  
394043, Воронеж, ул. Ленина, 73а, e-mail: ksen.me@inbox.ru

<sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет,  
394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, e-mail: nikita.gyndin@gmail.com

© Бухольцев И.М., Рындин Н.А., 2025

В статье рассмотрен оптимизационный подход к повышению эффективности управления распределением инвестиционного ресурса между объектами организационной системы с учетом интегрального объема инвестиций и уровня показателей эффективности развития, определяемых управляющим центром. С целью повышения эффективности программно-целевого подхода к развитию многообъектной организационной системы (МОС) разработан ряд моделей и алгоритмов моделирования и оптимизации распределения инвестиций при управлении данным процессом. При этом рассмотрены как процессы балансировки назначения инвестиций по направлениям программы развития, так и процессы ребалансировки по результатам мониторинга первоначальной программы и наличия высвободившихся ресурсов. Приведен пример формализации оптимизационной задачи ребалансировки, ее экстремальных и граничных условий. Предложен способ ранжирования объектов по критерию упущенной выгоды, определяемому по итогам мониторинга выполнения планов развития МОС по отдельным программам и экспертным путем. В качестве меры близости этих ранговых рядов используется коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Показано применение разработанных программных средств, сопряженных с информационной системой мониторинга реализации программы развития, в практике управления инвестированием организационных систем на примере распределения субсидий для реализации программы сельскохозяйственного развития региона в департаменте аграрной политики Воронежской области.

*Ключевые слова:* оптимизационное моделирование, многообъектная организационная система, инвестиции, ребалансировка, программный комплекс.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-55-65**

## ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе управление развитием организационных систем осуществляется с использованием программно-целевого подхода [1, 2]. На его основе процесс принятия управленческих решений направлен на формирование программы развития организационных систем разной сложности: автономных, сетевых, отраслевых, региональных. Большинство из них являются многообъектными, базирующимися на взаимодействии управляющего центра и отдельных объектов. При этом главное внимание уделяется распределению инвестиционного ресурса между объектами системы с учетом интегрального объема инвестиций и уровня показателей эффективности развития, определяемых управляющим центром. Для характеристики структуры инвестирования структура МОС рассматривается как множество объектов с однородными видами деятельности  $O_i, i = \overline{1, I}$ , объединенных в организационное целое. Их целенаправленное взаимодействие при инвестировании программы развития на множестве временных промежутков  $t = \overline{1, T}$  обеспечивает управляющий центр [3, 4].

Развитие МОС представлено как смена программ развития и их целеориентированности [5, 6]. Пусть в периоды  $t_1 = \overline{1, T_1}$  действовала программа 1, цели которой определялись достижением показателями  $y_{j_1}$  уровня  $y_{j_1}^0, j_1 = \overline{1, J_1}$ . При этом осуществлялось инвестирование по  $n_1$ -му ( $n_1 = \overline{1, N_1}$ ) направлению программы в объемах  $C_{in_1}(t)$  и проводился мониторинг значений показателей каждого объекта  $O_i, i = \overline{1, I}, y_{j_1 in_1}(t_1), t_1 = \overline{1, T_1}$ .

После выполнения указанной программы и достижения значений  $y_{j_1 in_1}(T_1)$  разрабатывается включающая  $n = \overline{1, N}$  направлений программа 2, цели которой определяются достижением показателями  $y_j$  уровня  $y_j^0, j = \overline{1, J}$ , где  $\overline{1, J_1} \cap \overline{1, J} \neq \emptyset$ , при заданном горизонте планирования  $t = \overline{1, T}$ .

Процесс балансировки инвестиций при формировании программы 2 направлен на обеспечение следующих балансовых условий распределения интегрального ресурса  $C$ , выделенного управляющим центром на развитие  $O_i, i = \overline{1, I}$  объектов по  $n = \overline{1, N}$  направлениям с целью достижения показателями значений  $y_{j in}^0$  при заданном горизонте планирования  $t = \overline{1, T}$ :

между направлениями программы:

$$\sum_{n=1}^N C_n = C, \quad (1)$$

где  $C_n$  – объем инвестиций для реализации  $n$ -го направления программы 2;

между объектами организационной системы по участию в реализации  $n$ -го направления и объема инвестиций  $C_{in}$ :

$$\sum_{i=1}^I C_{in} = C_n, \quad (2)$$

между мероприятиями программы 2, направленными на достижение показателями значений  $y_{j in}^0$ :

$$\sum_{j in=1}^{J in} C_{j in} = C_{in}, \quad (3)$$

где  $C_{ji_n}$  – объем инвестиций, позволяющий реализовать мероприятия -го направления на развитие объекта по показателю  $j$  за все периоды  $t = \overline{1, T}$ ;  
 между периодами реализации программы 2 при заданном горизонте планирования:

$$\sum_{t=1}^T C_{ji_n}(t) = C_{ji_n}, \quad (4)$$

где  $C_{ji_n}(t)$  – объем инвестиций в каждый промежуток времени  $t$ ,  $t = \overline{1, T}$ , для реализации мероприятий, обеспечивающих заданный рост значений показателя  $y_{ji_n}$ .

Выполнение балансового условия (2) достигается за счет привлечения к -му направлению программы 2 подмножества объектов организационной системы  $i'_n = \overline{1, I'_n}$ . В этом случае оптимизационное моделирование направлено на выбор значений альтернативных переменных:

$$x_{in} = \begin{cases} 1, & \text{если } i - \text{й объект целесообразно инвестировать} \\ & \text{по } n - \text{му направлению программы развития,} \\ 0 & \text{в противном случае, } i_n = \overline{1, I_n}, n = \overline{1, N} \end{cases} \quad (5)$$

в соответствии с оптимизационной моделью

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N \alpha_{in} x_{in} &\rightarrow \max_{x_{in}}, \\ \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N C_{i_n}^0 x_{in_2} &\leq C, \\ x_{in} &= \begin{cases} 1, \\ 0, \end{cases} \quad i_n = \overline{1, I_n}, n = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для формализации экстремального требования в модели (6) используется линейная функция, в которой коэффициенты  $\alpha_{in}$  определяют значимость влияния инвестиций по  $n$ -му направлению на развитие  $i$ -го объекта.

Коэффициенты значимости определяются с использованием экспертных оценок значений:

объема инвестиций  $C_{i_n}^{np}$ , прогнозируемого для обеспечения оптимальных условий развития  $i$ -го объекта по -му направлению программы 2;

термов лингвистической переменной <Допустимо изменить показатели развития  $i$ -го объекта в соответствии с требованиями за счет инвестирования -го направления программы 2>.

Для решения задачи (6) используется алгоритм, основанный на интеграции рандомизированного поиска на множестве булевых переменных и верхних оценок корня дерева метода ветвей и границ [7].

## **ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА РЕБАЛАНСИРОВКИ ИНВЕСТИЦИЙ**

Назначение инвестиций по направлениям программы развития осуществляется на основе балансового условия (3) путем решения оптимизационной задачи (6). В результате по каждому -му направлению определяется подмножество объектов

$i_n = \overline{1, I_n} \in \overline{1, I}$ , которые используют инвестиции  $C_{in}^* = C_{in}^0$  в рамках программы развития. Поскольку значения  $C_{in}^0$ ,  $i_n = \overline{1, I_n}$  есть экспертные прогностические оценки потребности в инвестиционном ресурсе каждого объекта  $i_n = \overline{1, I_n}$ , распространенной ситуацией при реализации программы развития в течение промежутка времени  $\tau$ , включающего временные периоды  $t = \overline{1, \tau}$ , является освоение инвестиций  $C_{i_n}^*(t)$  рядом объектов  $i_n = \overline{1, I_n}$  в неполном объеме. В этом случае для последующих периодов  $t = \overline{\tau + 1, T}$  целесообразно провести ребалансировку инвестиций за счет высвободившегося ресурса:

$$\Delta C_n = \sum_{i_n=1}^{I_n'} \sum_{t=1}^{\tau} (C_{i_n}^*(t) - C_{i_n}^P(t)), \quad (7)$$

где  $C_{i_n}^*(t)$  и  $C_{i_n}^P(t)$  – соответственно установленный управляющим центром и реально освоенный инвестиционный ресурс в период  $t = \overline{1, \tau}$ .

При балансировке назначения инвестиций по направлениям программы развития в задаче (6) используются коэффициенты значимости влияния инвестиций по  $i$ -му направлению на развитие  $i$ -го объекта, которые формируются с использованием априорных экспертных оценок. На основе известных к моменту  $\tau$  значений освоенных инвестиций  $C_{i_n}^P(t)$  предлагается для каждого объекта  $i = \overline{1, I}$  установить упущенную выгоду по  $i$ -му направлению программы развития:

$$v_{i_n'}(t) = \begin{cases} C_{i_n'}^*(t) - C_{i_n'}^P(t) & \text{для объектов с номерами } i = i_n', \\ 0 & \text{для объектов с номерами } i = \overline{1, I}, i \neq i_n'. \end{cases} \quad (8)$$

Значения (8) позволяют определить упущенную выгоду и на ее основе распределять высвободившийся ресурс (7) времени  $t = \overline{1, \tau}$ :

$$v_{i_n'} = \sum_{t=1}^{\tau} v_{i_n'}(t). \quad (9)$$

В свою очередь значения (9) дают возможность установить ранговую последовательность объектов в смысле упущенной выгоды с рангами  $r_i^n = \overline{1, I}$ . Ранг  $r^n = 1$  присваивается объекту с наибольшей упущенной выгодой, далее следуют объекты с убывающими значениями (9) и возрастанием величины ранга на единицу. Затем определяются ранги объектов  $r_i^n$  при  $v_{i_n'}(t) = 0$ . Здесь величина рангов возрастает по мере уменьшения значений коэффициентов значимости  $a_{in}$ .

Кроме рангового ряда  $r^n = \overline{1, I}$  формируется экспертный ранговый ряд  $e_i^n = \overline{1, I}$ , который отражает упорядоченность объектов в смысле упущенной выгоды по  $i$ -му направлению программы развития.

В качестве меры близости ранговых рядов  $r^n$  и  $e^n$  используем коэффициент ранговой корреляции Спирмена:

$$\rho^n = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^I (e_i^n - r_i^n)^2}{I(I^2 - 1)}. \quad (10)$$

Совпадению рангового ряда по результатам реализации программы развития и экспертного рангового ряда соответствует значение  $\rho^n = 1$ , что в редких случаях возможно для некоторых направлений развития. Тогда на промежуток времени  $t_1 = \overline{\tau + 1, T}$  сохраняют назначение, принятое в процессе балансировки инвестиций.

Несовпадение рассматриваемых ранговых рядов при  $-1 \leq \rho^n < 1$  требует изменения назначения инвестиций. Для выполнения процесса ребалансировки предлагается коррекция коэффициентов значимости с учетом значений уравнения (10). При однонаправленности ранговых рядов  $0 \leq \rho^n < 1$  имеем

$$a_{in}^{ck} = \rho^n a_{in}. \quad (11)$$

При разнонаправленности ранговых рядов  $-1 \leq \rho^n \leq 0$  значимость необходимо корректировать следующим образом:

$$a_{in}^{ck} = (1 + \rho^n) a_{in}. \quad (12)$$

Значения уравнений (11), (12) используются при формировании экстремального требования процесса ребалансировки с введением оптимизируемых альтернативных переменных:

$$z_{in} = \begin{cases} 1, \text{ если } i' - \text{ объект целесообразно инвестировать по } n - \text{ му} \\ \text{ направлению на промежутке времени } t_1 = \overline{\tau + 1, T_1}, \\ 0, \text{ в противном случае, } i' = \overline{1, I'}, \quad n = \overline{1, N}. \end{cases} \quad (13)$$

Граничные условия направлены на освоение высвободившегося ресурса (7) при экспертных оценках потребности  $i'$ -го объекта в инвестициях по  $n$ -му направлению на промежуток времени  $t_1 = \overline{\tau + 1, T_1}$ . Окончательно, с учетом условий бипарности (13), получаем следующую оптимизационную модель:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N a_{in}^{ck} z_{in} &\rightarrow \max_{z_{in}}, \\ \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N a_{in}^{\tau} z_{in} &\leq \sum_{n=1}^N \Delta C_n, \\ z_{in} &= \begin{cases} 1, & i = \overline{1, I}, \\ 0 & n = \overline{1, N}. \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

В результате решения задачи (14) получаем назначение инвестиций по направлениям программы развития на промежуток времени  $t = \overline{\tau + 1, T}$ , характеризующихся нумерационными множествами

$$i''_n = \overline{1, I''_n}, \quad n = \overline{1, N}. \quad (15)$$

Таким образом, сформированы модель и алгоритм принятия управленческого решения при ребалансировке инвестиций по направлениям программы развития, отличающиеся формой использования сравнительного анализа ранговых рядов объемов

упущенной выгоды в процессе оптимизации и обеспечивающие включение новых объектов для дополнительного инвестирования.

Оптимизация ребалансировки объемов заключается в максимально возможном выделении дополнительных инвестиций объектам с номерами  $i_n'' = \overline{1, I_n''}$  в соответствии равенствами (15) по -му направлению:

$$C_{i_n''}^D \rightarrow \max, \quad i_n'' = \overline{1, I_n''}. \quad (16)$$

Требование (16) является экстремальным требованием задачи.

Граничные требования определяются балансовым условием соответствия объему дополнительных инвестиций (7):

$$\sum_{i_n''=1}^{I_n''} C_{i_n''}^D = \Delta C_n \quad (17)$$

и экспертной оценкой интервалов потребности объектов в дополнительном инвестиционном ресурсе

$$C_{i_n''}^{\min} \leq C_{i_n''}^D \leq C_{i_n''}^{\max}. \quad (18)$$

Объединив экстремальные требования (16) с граничными (17), (18), получим следующую оптимизационную модель:

$$\begin{aligned} C_{i_n''}^D &\rightarrow \max, \quad i_n'' = \overline{1, I_n''}, \\ \sum_{i_n''=1}^{I_n''} C_{i_n''}^D &= \Delta C_n, \\ C_{i_n''}^{\min} &\leq C_{i_n''}^D \leq C_{i_n''}^{\max}. \end{aligned} \quad (19)$$

Для получения управленческого решения на основе решения задачи (19) разработана структурная схема алгоритма преобразования и поиска оптимального решения, приведенная на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема оптимизации ребалансировки объемов инвестиций по направлениям программы развития МОС

## ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ОПТИМИЗАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ БАЛАНСИРОВКИ И РЕБАЛАНСИРОВКИ ИНВЕСТИЦИЙ В МНОГООБЪЕКТНОЙ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

Для использования разработанного комплекса моделей и алгоритмов балансировки и ребалансировки инвестиций в практике управления развитием МОС созданы следующие программные средства:

модуль 1. «Оптимизация назначения инвестиций по направлениям программы развития многообъектной организационной системы»;

модуль 2. «Оптимизация распределения объема инвестиций по направлениям программы развития многообъектной организационной системы»;

модуль 3. «Оптимизация распределения инвестиций по временным периодам программы развития многообъектной организационной системы».

Каждый модуль основывается на алгоритмах оптимизации инвестиций как при формировании, так и при реализации программы развития. При этом используются соответственно оптимизационные модели балансировки и ребалансировки инвестиций. Для реализации модулей 1, 2 требуется обращение к стандартному пакету программ оптимизации, включающему метод ветвей и границ. Для реализации модуля 3 требуется машинное обучение прогностической модели. С этой целью организуется обращение к стандартному пакету машинного обучения.

Структурная схема взаимодействия модулей с информационной системой мониторинга, стандартными пакетами программ машинного обучения и оптимизации в рамках системы управления инвестированием программы развития МОС приведена на рис. 2.

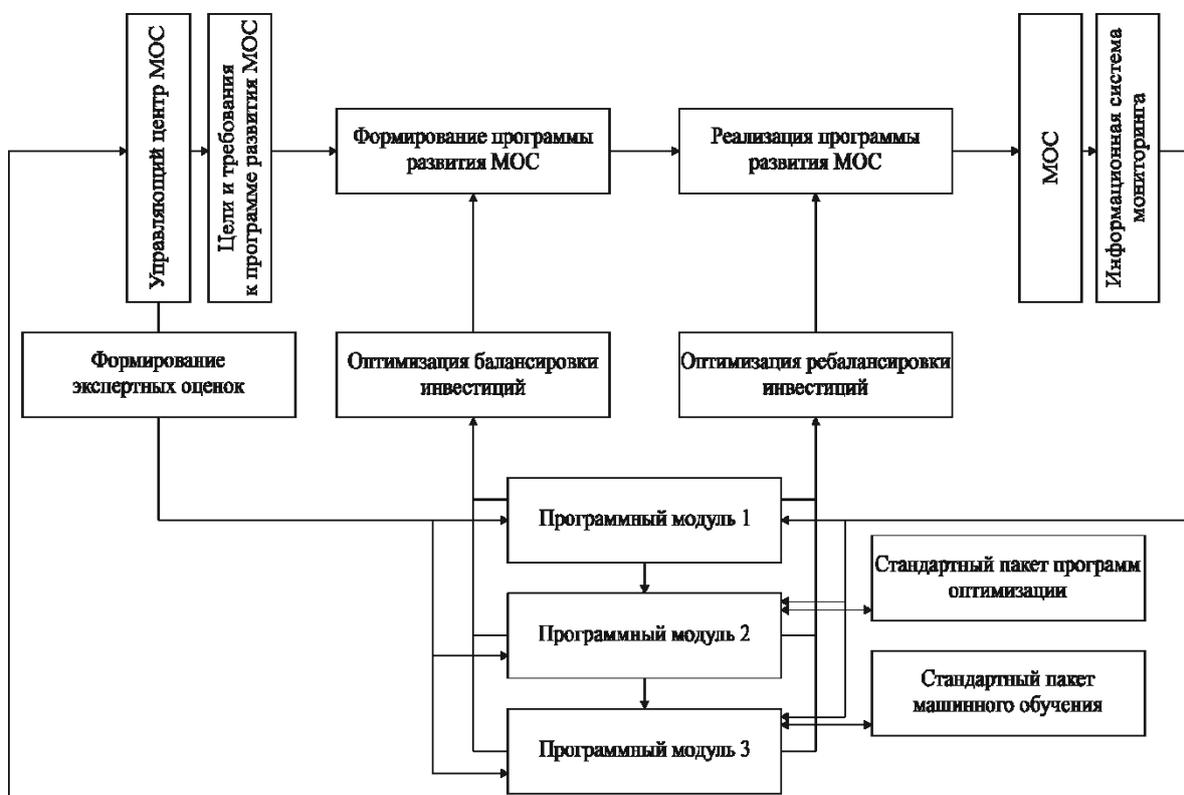


Рис. 2. Структурная схема взаимодействия разработанных программных модулей в рамках системы управления инвестированием развития МОС

Разработка программных средств позволяет перейти к их использованию в практике управления реальными МОС. Одним из классов таких систем являются региональные организационные системы аграрного профиля. Для них характерно повышение эффективности деятельности за счет инвестирования в рамках долгосрочных программ развития по целому ряду направлений. При этом инвестирование по направлению рассматривается как отдельный проект, взаимодействующий с другими проектами для обеспечения достижения заданных управляющим центром целей и выполнения требований к программе развития в целом.

Оценка результативности применения разработанных моделей, алгоритмов и программных средств осуществляется путем сравнения результатов вычислительных экспериментов по оптимизации балансировки и ребалансировки инвестиций с плановыми и мониторируемыми объемами освоенных инвестиций и достигнутыми уровнями показателей эффективности в рамках действующей программы развития региональной МОС аграрного профиля.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение эффективности управления МОС целесообразно осуществлять в рамках оптимизационного подхода. Применение последнего связано с формированием оптимизационных моделей процессов балансировки и ребалансировки инвестиций. Оптимизационное моделирование базируется на многоуровневой системе балансовых условий. Нижний уровень связан с обеспечением требований управляющего центра к росту значений показателей эффективности в промежутки времени, обусловленные заданным горизонтом развития объектов организационной системы. Оптимизация распределения объема инвестиций между периодами определяет построение оптимизационных моделей, обеспечивающих наилучший вариант распределения интегрального объема инвестиционного ресурса.

Оптимизационное моделирование процесса ребалансировки инвестиций направлено на обеспечение минимальных отклонений показателей эффективности от оптимальной стратегии, полученной на этапе балансировки. При этом приемлемы два способа ребалансировки в случае выявления отклонений по данным мониторинга: в заданный момент времени или при превышении отклонением порогового значения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Поспелов Г.С. Проблемы программно-целевого планирования и управления. М.: Наука, 2011. 460 с.
2. Райзберг Б.А. Программно-целевое планирование и управление. М.: ИНФРА-М, 2012. 428 с.
3. Львович Я.Е., Львович И.Я., Чопоров О.Н. [и др.]. Оптимизация цифрового управления в организационных системах: коллективная монография / под общ. ред. Я.Е. Львовича. Воронеж: ИПЦ Научная книга, 2021. 191 с.
4. Львович Я.Е., Рындин Н.А. Оптимизация распределения ресурсного обеспечения на стадиях развития и функционирования цифровизированных организационных систем // *Информационные технологии*. 2022. Т. 28. № 6. С. 294–301.
5. Руткаускас Т.К., Домников А.Ю., Медведева Л.А. [и др.]. Инвестиции и инвестиционная деятельность / под общ. ред. Т.К. Руткаускас. Екатеринбург: изд-во Уральского университета, 2019. 316 с.
6. Бухольцев И.М., Львович Я.Е., Рындин Н.А. Оптимизация распределения объема инвестиций при реализации программы развития многообъектной

организационной системы // *Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление»*. 2024. С. 234–241.

7. Львович И.Я., Львович Я.Е., Фролов В.Н. Информационные технологии моделирования и оптимизации: краткая теория и приложения. Воронеж: ИПЦ Научная книга, 2016. 444 с.

8. Бухольцев И.М. Структуризация управления инвестированием многообъектной организационной системы на стадиях формирования и реализации программы развития с использованием оптимизационного подхода // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024. Т. 12. № 2. С. 1–12.

9. Львович Я.Е., Львович И.Я. Принятие решений в экспертно-виртуальной среде. Воронеж: ИПЦ Научная книга, 2010. 140 с.

10. Баркалов С.А., Буркова И.В., Колпачев В.Н., Потапенко А.М. Модели и методы распределения ресурсов в управлении проектами. М.: Институт проблем управления, 2004. 85 с.

**Для цитирования:** Бухольцев И.М., Рындин Н.А. Оптимизационное моделирование при управлении ребалансировкой инвестиционного процесса развития многообъектной организационной системы // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 55–65.

## **OPTIMIZATION MODELING AT MANAGEMENT OF REBALANCING OF INVESTMENT PROCESS OF DEVELOPMENT OF MULTI-OBJECT ORGANIZATIONAL SYSTEM**

I.M. BUKHOLTSEV<sup>1</sup>, Postgraduate, N.A. RYNDIN<sup>2</sup>, Dr Sc.

<sup>1</sup>Voronezh Institute of High Technologies,  
73a, Lenina St., Voronezh, 394043, e-mail: ksen.me@inbox.ru

<sup>2</sup>Voronezh State Technical University,  
84, 20 Letiya Oktyabrya str., Voronezh, 394006, e-mail: nikita.ryndin@gmail.com.

The article considers an optimization approach to improving the efficiency of managing the distribution of investment resources between the objects of organizational systems, taking into account the integral volume of investments and the level of development efficiency indicators determined by the control center. In order to improve the efficiency of the program-targeted approach to the development of a multi-object organizational system (MOS), a number of models and algorithms for modeling and optimizing the distribution of investments in managing this process have been developed. At the same time, both the processes of balancing the assignment of investments in the areas of the development program and the processes of rebalancing based on the results of monitoring the initial program and the availability of released resources are considered. An example of formalizing the optimization problem of rebalancing, its extreme and boundary conditions is given. A method for ranking objects by the criterion of lost profit, determined based on the results of monitoring the implementation of MOS development plans for individual programs and by experts, is proposed. The Spearman rank correlation coefficient is used as a measure of the proximity of these rank series. The application of the developed software tools, coupled with the information system for monitoring the implementation of

the development program, in the practice of managing the investment of organizational systems is shown using the example of distributing subsidies for the implementation of the regional agricultural development program in the Department of Agrarian Policy of the Voronezh Region.

*Keywords:* optimization modeling, multi-object organizational system, investment, rebalancing, software package.

Поступила в редакцию/received: 07.10.2024; после рецензирования/revised: 14.10.2024;  
принята/accepted: 22.11.2024

УДК 623.618.5

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ**

Г.В. КАЗАКОВ, канд. техн. наук

4-й Центральный научно-исследовательский институт Минобороны России,  
141092, Московская обл., Королев, ул. М.К. Тихонравова, 29, e-mail: kgv.64@mail.ru

© Казаков Г.В., 2025

В статье раскрываются вопросы применения искусственного интеллекта в жизненном цикле автоматизированных систем подготовки данных управления летательными аппаратами. В настоящее время происходит затягивание сроков создания таких систем и сдачи их в эксплуатацию. Причинами этого является недостаточная степень автоматизации процессов проектирования, разработки конструкторской документации, испытаний и сопровождения эксплуатации системы. Предлагаемая универсальная система управления жизненным циклом системы подготовки данных основана на использовании искусственного интеллекта и состоит из совокупности автоматизированных рабочих мест: проектирования системы, программирования, испытаний и сопровождения эксплуатации системы. Проведен расчет времени, затрачиваемого на разработку системы, и показан предполагаемый эффект от применения искусственного интеллекта в этом процессе.

*Ключевые слова:* автоматизированное рабочее место, автоматизированная система подготовки данных, жизненный цикл, летательный аппарат, программирование, проектирование, сопровождение, тестирование

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-65-76**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одной из основных систем критического приложения, от функционирования которой зависит качественное выполнение задач полета летательными аппаратами (ЛА), является автоматизированная система подготовки данных (АСПД) управления ЛА. Под АСПД управления ЛА будем понимать организационно-техническую систему, предназначенную для подготовки данных управления ЛА, обеспечивающих вывод ЛА на заданный маршрут с требуемой точностью.

Жизненный цикл (ЖЦ) АСПД представляет собой непрерывный процесс, начинающийся с момента принятия решения о необходимости создания (модернизации) системы и завершающийся снятием ее с эксплуатации [1–3]. При этом фазы ЖЦ фиксированы и в общем виде распределены неравномерно (рис. 1).

По мнению ряда экспертов, средняя продолжительность ЖЦ любой информационной системы составляет порядка 15 лет. Однако необходимо учитывать и то обстоятельство, что сроки физического и морального старения техники и программного обеспечения системы будут значительно отличаться в зависимости от различных факторов, обусловленных спецификой отрасли, и самой информационной системы [2].

Анализ ЖЦ АСПД показал, что в настоящее время минимальный срок от сдачи системы в эксплуатацию и до принятия решения на ее разработку (модернизацию) составляет от трех до пяти лет. Причинами сокращения продолжительности жизненного цикла АСПД являются:

динамично меняющийся типаж парка ЛА, имеющих различные летные характеристики;

быстрая смена версий операционных систем электронно-вычислительной техники (ЭВТ), что влечет за собой необходимость доработки специального программного обеспечения (СПО) подготовки данных управления ЛА;

внедрение новых бортовых носителей полетной информации и др.

При этом могут изменяться форматы данных, работающий с системой персонал, поддерживающая инфраструктура. Неизменной может остаться только информация, и именно она является связующим звеном, позволяющим говорить о работе с одной и той же информационной системой.

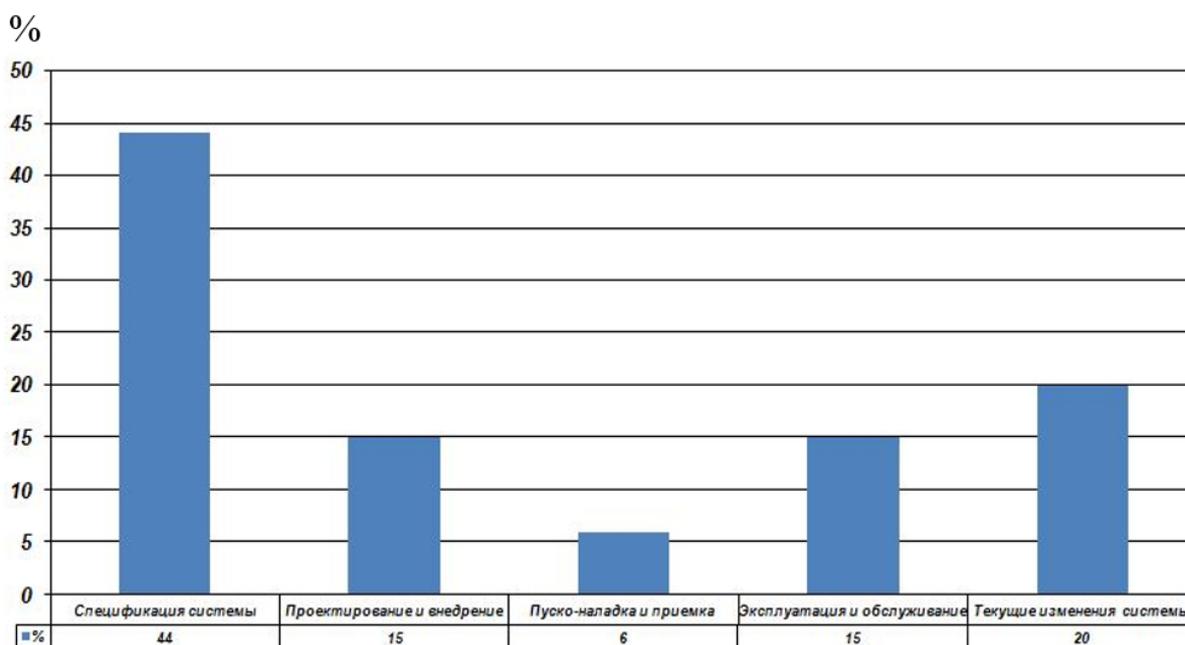


Рис. 1. Распределение фаз ЖЦ АСПД

Применительно к АСПД можно выделить следующие основные недостатки существующих подходов к ЖЦ системы:

преобладание узковедомственного и видового подхода к созданию АСПД (отсутствие средств автоматизированного проектирования и подготовки рабочей конструкторской документации (РКД), средств автоматизированного создания и тестирования СПО подготовки данных управления ЛА);

отсутствие у разработчиков подсистем АСПД информации о смежных разработках, что приводит к слабому использованию как существующих унифицированных проектных решений, так и передового опыта создания систем и средств автоматизации;

отсутствие единой нормативно-технической базы и политики сопровождения ЖЦ АСПД;

разработка и сопровождение подсистем АСПД различными разработчиками, использование в их ЖЦ различной технологической базы;

отсутствие отечественной электронной компонентной базы (ЭКБ) для создания системы.

Указанные недостатки приводят к увеличению сроков и стоимости разработки АСПД, ухудшению качества их функционирования. В конечном итоге, в эксплуатацию принимаются АСПД, не в полной мере отвечающие первоначальному тактико-техническим требованиям.

По статистике порядка 1/3 информационных систем прекращают свое существование еще на этапе проектирования из-за несоответствия методов управления проектами, сложности проекта, ограничений по срокам и стоимости и др., вследствие чего роль разработчика системы значительно возрастает на фазах проектирования и внедрения системы, а также при эксплуатации АСПД. В этом процессе выделяются стадии эскизного и технического проектирования, разработки рабочей конструкторской документации и испытаний системы.

Цель статьи заключается в разработке предложений по созданию системы управления жизненным циклом автоматизированной системы подготовки данных управления ЛА с целью сокращения сроков создания АСПД при сохранении ее качественных характеристик.

### **ОБЛИК СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ ДАННЫХ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Первой и, пожалуй, главной стадией ЖЦ АСПД является эскизное и техническое проектирование системы. На этой стадии, наряду с описанием выполнения общих требований (унификации, стандартизации, каталогизации, стойкости к воздействию внешних факторов и т.д.), решаются вопросы разработки технических и программных средств системы.

В связи со сложившейся геополитической обстановкой многие организации столкнулись с вынужденным импортозамещением: некоторые иностранные решения, применяемые в России, перестали полноценно функционировать, с обновлениями также возникают проблемы. Например, компания VMware приостановила все продажи, поддержки и сервисы в России, отозвала учетные записи пользователей техподдержки, Microsoft объявила о приостановке продаж новых продуктов в России, а SAP сообщила

о приостановке деятельности и продаж на территории нашей страны. В связи с этим тема импортозамещения ЭВТ вышла на первое место.

В марте 2022 года Президентом Российской Федерации был подписан Указ о мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности национальной критической информационной инфраструктуры (КИИ) [4]. Согласно [4], госзаказчикам с 31 марта 2022 года запрещено без согласования с соответствующими ведомствами закупать иностранное программное обеспечение (ПО) для использования на объектах КИИ. Кроме того, с 1 января 2025 года вводится полный запрет на использование зарубежного ПО на значимых объектах критической инфраструктуры.

Под действие Указа [4] попадают практически все субъекты КИИ, которые осуществляют закупки по Федеральному закону от 18.07.2011 № 223-ФЗ «О закупках товаров, работ, услуг отдельными видами юридических лиц». Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации № 1478 заказчики, попадающие под действие Указа Президента РФ № 166, для использования на значимых объектах КИИ могут закупать только такое ПО, информация о котором включена в реестры российского или евразийского ПО.

В этой связи проблемой для разработчика АСПД становится задача закупки необходимой ЭВТ, что существенно затягивает сроки разработки эскизного и технического проектов. Федеральным законом от 05.04.2013 № 44-ФЗ «О контрактной системе в сфере закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд» закупки признаются законными, если участник закупки предложил по результатам проведения процедуры подачи предложений о цене контракта или о сумме цен единиц товара, работы, услуги наиболее низкую цену контракта. Однако наименьшая цена, как правило, не является залогом успешного выполнения задачи. Поиск ЭВТ с необходимыми эксплуатационными характеристиками должен носить системный характер через обращение, например, в Минпромторг.

Другой проблемой является разработка монтажных схем программно-аппаратных комплексов подготовки данных управления ЛА из состава АСПД. Такая операция, как правило, выполняется вручную и занимает много времени. Приемлемым выходом в данном случае могут служить системы управления проектами, представителями которых являются:

Visary Project (разработчик – Научно-производственный центр «Бизнес Автоматика»). Система объединяет в себе современный инструментарий для администрирования программ, портфелей проектов и задач. Является полнофункциональным аналогом Oracle Primavera, SAP PPM и MS Project. Поддерживает полный цикл проектного управления, позволяет контролировать ход реализации сложных многоступенчатых проектов, планировать мероприятия, управлять изменениями, работать с идеями, вести дискуссии в рамках проектов и задач, контролировать трудовые и финансовые ресурсы, а также отслеживать риски;

«Компас-3D» (разработчик – «Аскон»). Система автоматизированного трехмерного моделирования и разработки конструкторской документации. Обеспечивает поддержку наиболее распространенных форматов 3D-моделей (STEP, ACIS, IGES, DWG, DXF), что позволяет организовывать обмен данными со смежными организациями и заказчиками, использующими различные CAD/CAM/CAE-системы в работе;

T-Flex CAD (разработчик – «Топ Системы»). Программное решение профессионального уровня, объединяющее в себе параметрические возможности 2D- и 3D-моделирования со средствами создания и оформления чертежей и конструкторской документации. Продукт включает широкие средства автоматизации проектирования, специальные инструменты для работы с большими сборками, поддерживает единую документную структуру, возможность вести коллективную разработку и прочие востребованные в конструкторской среде функции. Обеспечивает прямое чтение и импорт файлов различных CAD-систем (AutoCAD, Autodesk Inventor, SolidWorks, Siemens NX, Creo и др.), а также экспорт данных в DWG, Parasolid, ACIS, STEP, 3D PDF и прочие востребованные форматы.

Таким образом, первым автоматизированным рабочим местом (АРМ) системы создания АСПД является АРМ проектирования системы. Суть работы АРМ заключается в автоматизированном опросе баз данных ЭКБ Минпромторга, баз данных предприятий разработчиков ЭВТ и в автоматизированном использовании систем управления проектами. Входные данные АРМ-проектирования АСПД – требования тактико-технического задания на создание системы, выходные данные – технический облик АСПД и ее устройств (рис. 2).

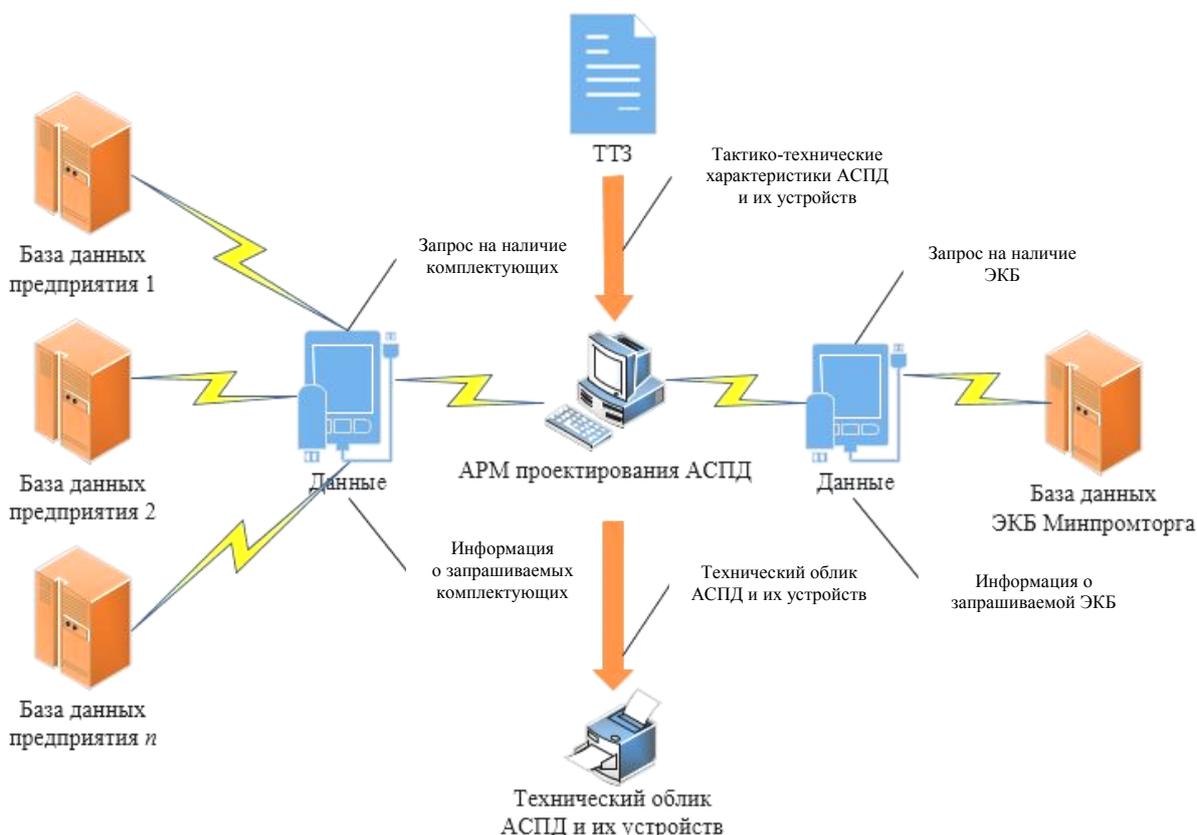


Рис. 2. Схема работы АРМ-проектирования АСПД

Задачей выполнения фазы разработки рабочей конструкторской документации является разработка СПО подготовки данных управления ЛА и документации на него. При этом используется метод программирования на языках высокого уровня.

Методами проектирования и разработки ПО АСПД могут являться Low-code («низкий код») и ChatGPT.

К достоинствам Low-code относятся:

снижение требований к специалистам. Работа с платформой не требует обширных знаний и многолетнего опыта – достаточно владеть базовыми навыками работы с кодом;

ускорение разработки. Работа с кодом нужна только для корректировки и адаптации основных компонентов;

повышение безопасности. Платформы позволяют выполнять задачи разработки собственными силами;

уменьшение затрат. Ускорение разработки наряду с использованием специалистов помогает экономить ресурсы компании;

автоматизация разработки. Некоторые платформы поддерживают технологии роботизированной автоматизации процессов, обеспечивающие автоматизацию процессов на основе использования виртуальных компьютерных программ, а также AI (искусственный интеллект) и ML (машинное обучение).

Примерами систем Low-code являются ELMA365, GreenData, Первая Форма, Directum RX, Knowledge Space, Case Platform, РЕД Платформа и др. Такие системы функционируют в операционных системах Windows, Linux (в отдельных случаях и в MacOS). Отмечаются такие их достоинства, как низкая цена, кросс-платформенность, интеграция с другими сервисами, наличие большого набора готовых модулей и шаблонов, поддержка создания цифровых двойников процессов. Лучшие из рассмотренных, ELMA365, GreenData и Первая Форма, предлагают требуемый функционал и низкие цены и поддерживают разработку Low-code и полноценную работу с кодом. Сервис РЕД Платформа имеет узкоспециализированный функционал.

Наряду с Low-code существуют метод No-code, предполагающий разработку исключительно в графическом интерфейсе без кода. Если работа с платформами Low-code требует определенных навыков программирования, то для использования платформ No-code специальные знания и навыки работы с кодом не нужны. Однако для создания таких систем критического приложения, как АСПД, необходимы высококвалифицированные программисты.

Generative Pretrained Transformer (ChatGPT) – это платформа, которая помогает разработчикам ПО создавать приложения, отвечающие индивидуальным потребностям. Она предоставляет ряд инструментов и возможностей, таких как удобные интерфейсы, комплексная аналитика и алгоритмы машинного обучения.

Достоинства ChatGPT:

предоставление широкого спектра инструментов и возможностей;

настройка приложения в соответствии с конкретными потребностями заказчика;

использование алгоритмов машинного обучения и методов обработки естественного языка;

всесторонняя аналитика, позволяющая отслеживать данные о вовлеченности и активности пользователей в режиме реального времени, что поможет оптимизировать работу приложения и принимать обоснованные решения о его дальнейшем развитии.

Некоторые специалисты считают, что на текущем уровне развития машинного интеллекта создать работающий проект возможно, но очень трудозатратно и сложно. Нужно иметь технические компетенции, чтобы составлять работающие **запросы (инструкции или входные данные), которые отправляются нейросети для выполнения конкретной задачи.** Исследователи считают, что нейросеть не заменит программистов в ближайшем будущем, но станет обязательным инструментом разработки. В перспективе большая часть кода будет писаться без участия человека, тогда как программист будет заниматься лишь отладкой, **поиском, анализом и исправлением ошибок в программном коде или программе.**

Вторым АРМ системы создания АСПД является АРМ программирования. Суть работы АРМ заключается в автоматизированном использовании ChatGPT, автоматизированном опросе баз данных информационно-поисковой системы Федерального института промышленной собственности России (ФИПС), фондов алгоритмов и программ разработчиков СПО. Входные данные АРМ программирования – требования тактико-технического задания на создание системы, выходные данные – программный код и конструкторская документация (рис. 3).

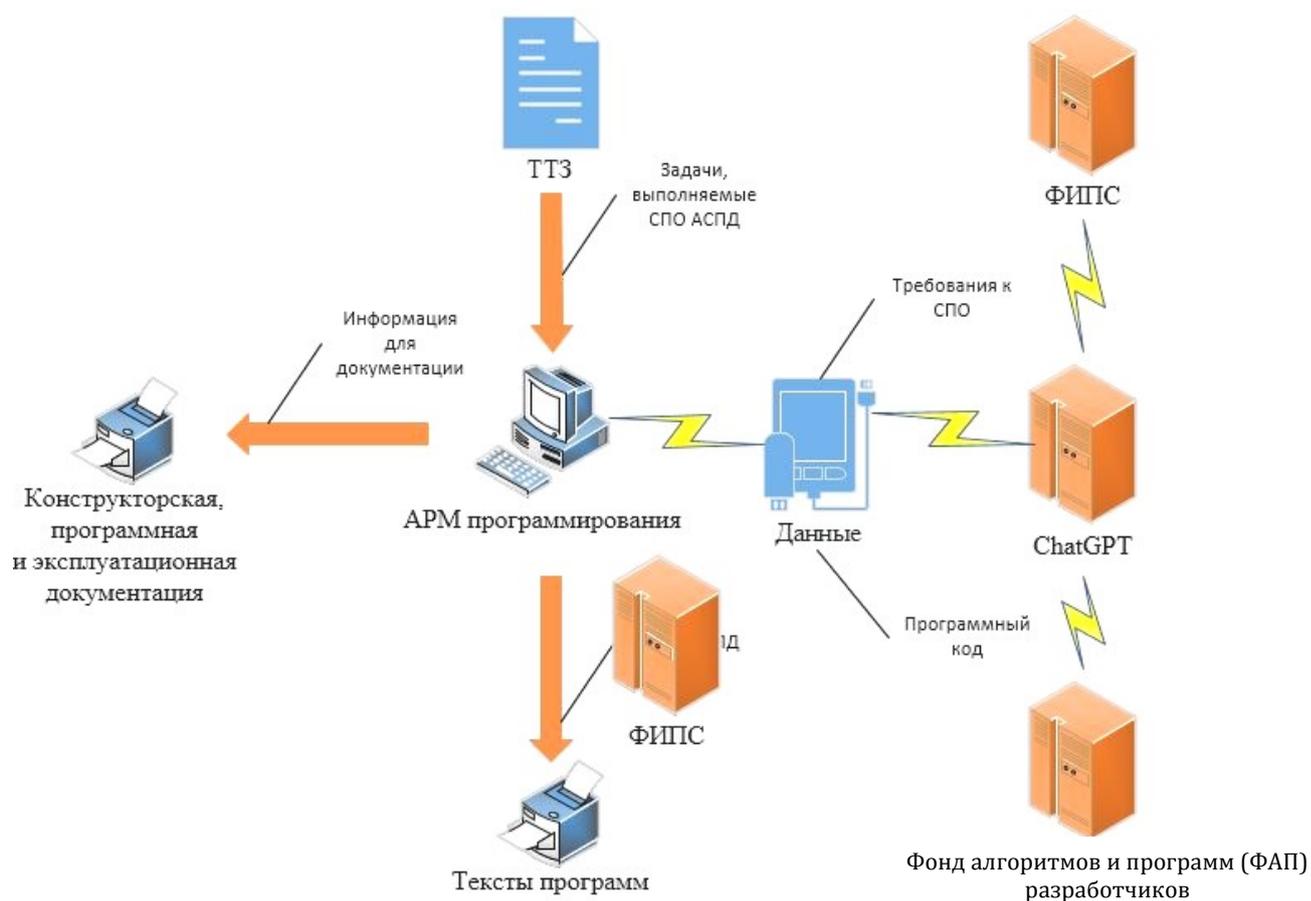


Рис. 3. Схема работы АРМ программирования

При комплексных испытаниях компонентов СПО подготовки данных управления ЛА обрабатывается большое количество входной, промежуточной и результирующей информации. Это порой не под силу не только одному специалисту, но и целому коллективу. В данных условиях целесообразно использовать технологии искусственного интеллекта.

Искусственный интеллект играет жизненно важную роль в тестировании компонентов СПО, делая процесс быстрее, точнее и эффективнее [5, 6] благодаря наличию ряда преимуществ, основными из которых являются следующие [7]:

расширенное тестовое покрытие. Искусственный интеллект можно использовать для более быстрого и эффективного выполнения тестов, что обеспечивает увеличение охвата тестами. Инструменты на базе искусственного интеллекта также могут выявлять новые тестовые случаи, которые могут быть пропущены тестировщиками-людьми;

улучшенная точность тестирования. Искусственный интеллект можно применять для выявления и устранения ложных срабатываний, что уменьшит количество ненужных отчетов об ошибках. Кроме того, искусственный интеллект можно научить выявлять крайние случаи, которые могут быть пропущены людьми-тестировщиками, для повышения общей точности процесса;

более быстрое выполнение теста. Инструменты на базе искусственного интеллекта могут выполнять тесты быстрее и эффективнее, чем тестировщики-люди, позволяя командам разработчиков сосредоточиться на решении других задач;

сокращенное техническое обслуживание тестов. При помощи искусственного интеллекта можно выявлять и исправлять ненадежные тесты, экономя время и усилия, необходимые для обслуживания тестов;

улучшенная приоритизация тестов. Искусственный интеллект можно использовать для приоритизации тестов в зависимости от их влияния на систему, при этом критическая функциональность будет тщательно протестирована в первую очередь;

непрерывное тестирование. Автоматизации процесса тестирования при помощи искусственного интеллекта позволяет проводить непрерывное тестирование на протяжении всего цикла разработки. Это позволяет обнаруживать ошибки на ранних этапах процесса, а значит, снижать общую стоимость устранения проблем;

экономия на издержках. Тестирование с применением устройств на основе искусственного интеллекта может значительно снизить стоимость тестирования, поскольку требуется меньше человеческих ресурсов. Кроме того, искусственный интеллект может помочь выявлять и устранять проблемы на ранних этапах цикла разработки, снижая затраты на исправление ошибок в дальнейшем.

При том, что использование искусственного интеллекта может принести многочисленные преимущества в тестировании СПО, существуют также проблемы, а именно [7]:

отсутствие квалифицированного персонала;

несовместимость инструментов тестирования на основе искусственного интеллекта с устаревшими системами испытаний, что требует значительных инвестиций в новую инфраструктуру и инструменты;

неадекватность или ошибочность начальных данных и, как следствие, неточные результаты испытаний, ложные срабатывания и неучтенные дефекты;

необъективность обучающих данных, что может быть особенно проблематично в случае моделей машинного обучения, используемых при тестировании, где необъективные модели могут привести к неверным результатам тестирования;

отсутствие прозрачности работы системы искусственного интеллекта для пользователей, что может вызвать недоверие к полученным результатам;

высокая стоимость интеграции искусственного интеллекта в процессы тестирования ПО.

Необходимость совершенствования технологии испытаний СПО подготовки данных управления ЛА обусловлена также следующими причинами:

- значительными временными затратами на подготовку и согласование всего объема тестовых вариантов (ТВ) между заинтересованными организациями;
- использованием ограниченного количества ТВ (порядка одной-двух сотен ТВ);
- трудоемкостью ввода и контроля ТВ в требуемой структуре и формате;
- высокой долей ручного труда при проведении сравнительного анализа результатов совместных расчетов составных частей СПО подготовки данных управления ЛА (СПО типа  $n$ , где  $n = 1, 2, \dots, m$ ), функционирующих в разных операционных системах.

Курс, взятый на автоматизацию совместной отработки испытаний и увеличение объема проверок СПО подготовки данных управления ЛА в современных условиях, возможен в связи с достигнутыми высокими показателями роста производительности и быстродействия ПЭВМ и высоким уровнем развития современных программно-аппаратных технологий обработки информации.

Из изложенного явствует, что выполнение перечисленного объема работ по проведению испытаний компонентов СПО в разумные сроки без участия технологий искусственного интеллекта невыполнима. Средний срок проведения испытаний СПО подготовки данных управления ЛА с использованием существующей технологии, сравнительно облегченной по сравнению с заявленной, составляет порядка двух лет.

Третьим АРМ системы создания АСПД является АРМ тестирования ПО. Суть работы АРМ заключается в автоматизированной генерации ТВ, параллельном выполнении СПО типа  $n$  и автоматическом анализе результатов. Входные данные АРМ-тестирования – допустимые значения параметров, выходные данные – заключение о надежности разработанного СПО подготовки данных управления ЛА (рис. 4).

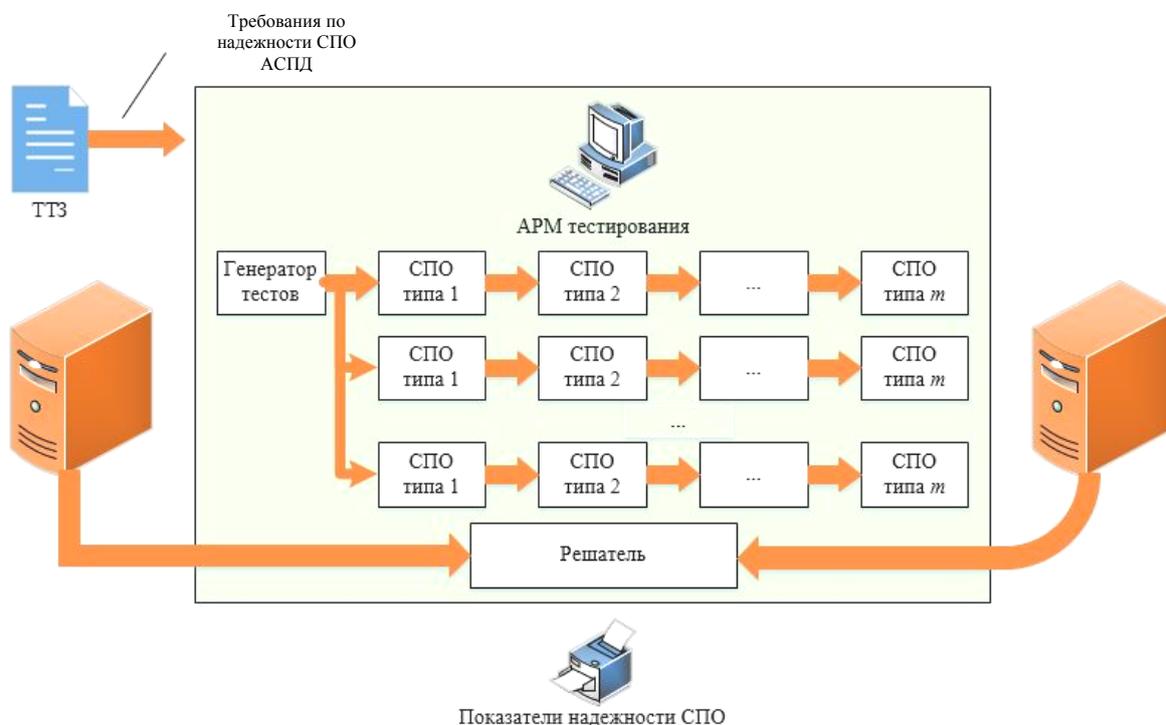


Рис. 4. Схема работы АРМ тестирования СПО подготовки данных управления ЛА

Сопровождение эксплуатации АСПД – одна из наиболее трудных задач для разработчика системы. Несмотря на действующие контракты и руководящие документы, информация об отказах оборудования, ошибках в СПО подготовки данных управления ЛА не всегда своевременно доводится до разработчика системы, что влияет на качество функционирования АСПД.

Фактически, следующим элементом системы разработки АСПД становится АРМ сопровождения эксплуатации системы, который объединяет задачи АРМ проектирования АСПД, АРМ программирования и АРМ тестирования СПО подготовки данных управления ЛА. Входные данные АРМ сопровождения – рекламации о неисправностях (ошибках), выходные данные – доработанная ЭВТ и СПО подготовки данных управления ЛА (рис. 5).

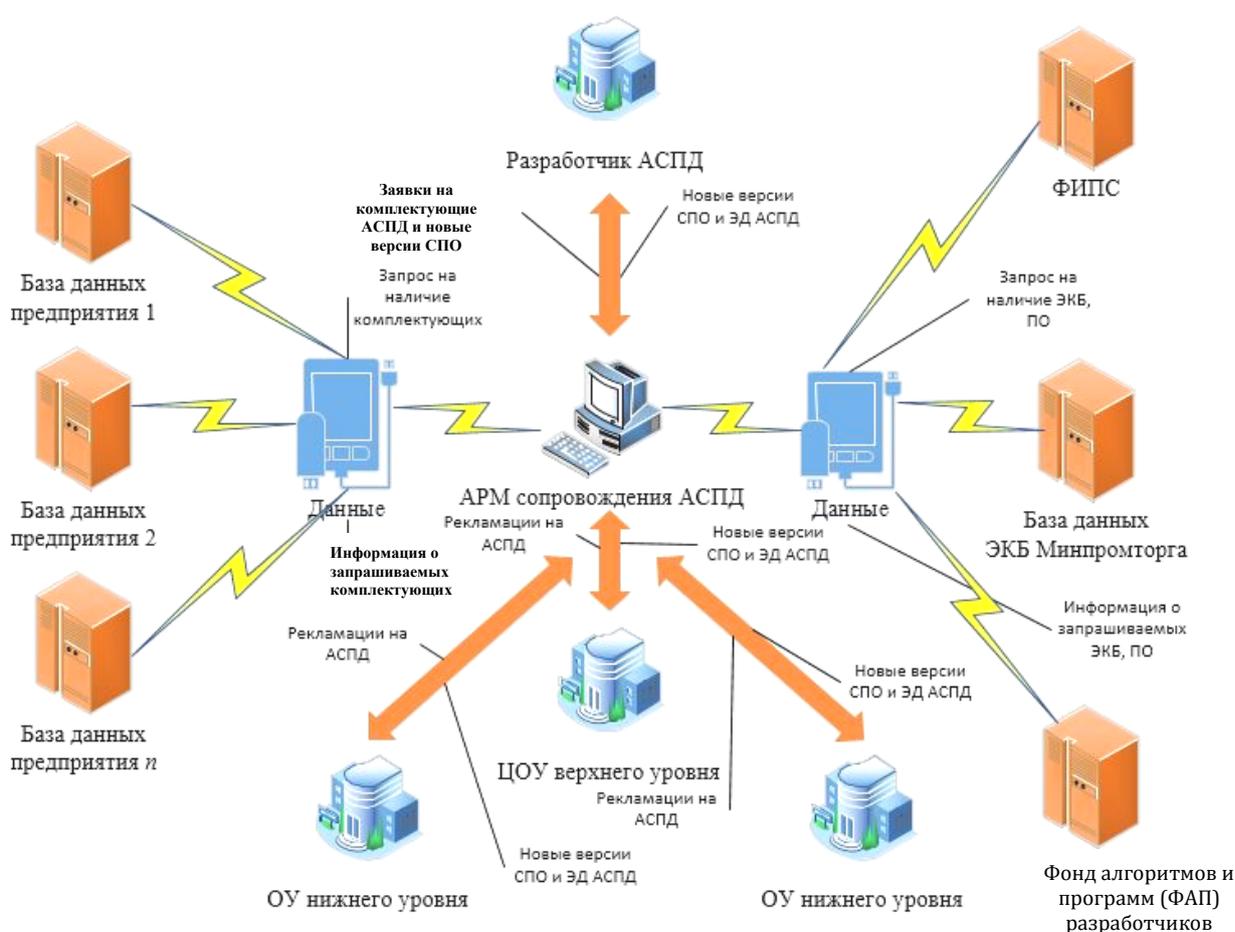


Рис. 5. Схема работы АРМ сопровождения эксплуатации АСПД

Таким образом, систему управления ЖЦ АСПД можно представить в виде следующей совокупности (рис. 6):

- АРМ проектирования АСПД;
- АРМ программирования;
- АРМ тестирования СПО подготовки данных управления ЛА;
- АРМ сопровождения эксплуатации АСПД.

Для оценки эффективности предложенных решений по созданию системы управления ЖЦ АСПД получены осредненные значения продолжительности разработки АСПД в период с 1995 по 2022 годы. Анализ тех стадий ЖЦ АСПД, где можно получить сокращение времени разработки системы, показал, что в настоящее время существенный прирост достигнутого эффекта может получиться при испытаниях СПО подготовки данных управления ЛА. Общий эффект составит порядка 25 % (рис. 7).

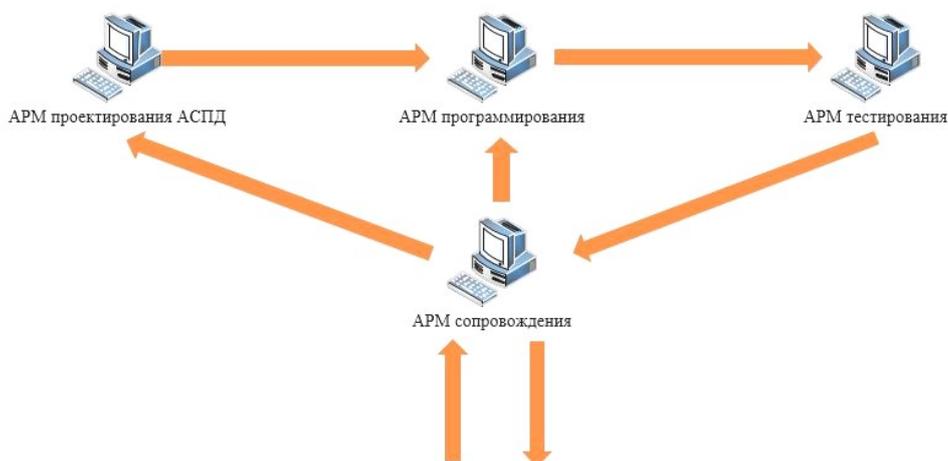


Рис. 6. Схема работы системы управления жизненным циклом АСПД

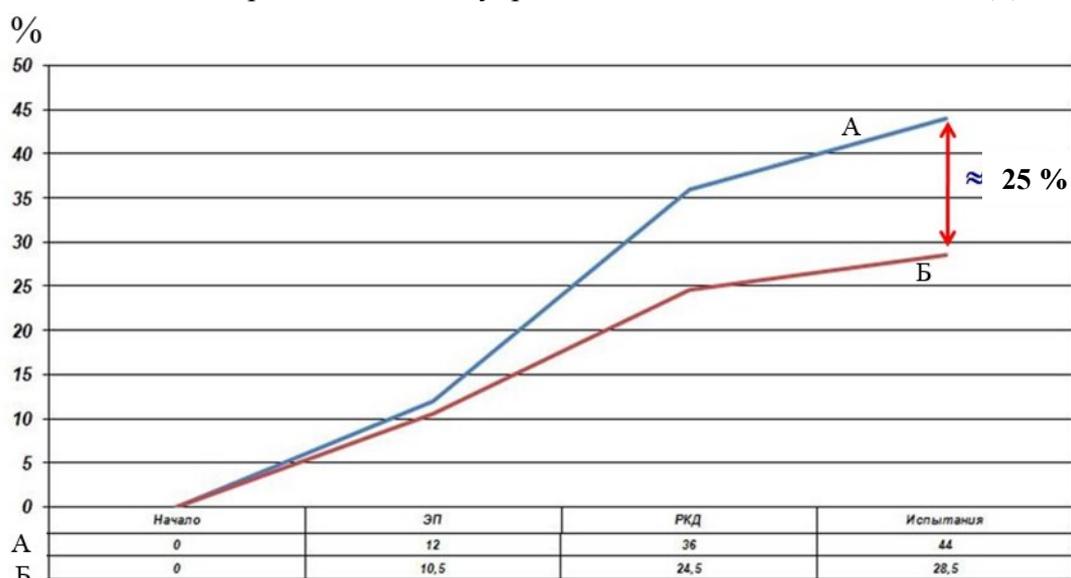


Рис. 7. Оценка эффекта от внедрения системы управления ЖЦ АСПД:  
А – существующий подход, Б – предлагаемый

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье предложена разработка универсальной системы управления жизненным циклом АСПД управления ЛА, основанной на использовании искусственного интеллекта. Система управления ЖЦ АСПД состоит из совокупности АРМ: АРМ проектирования АСПД, АРМ программирования, АРМ испытаний и АРМ сопровождения эксплуатации АСПД. Проведен расчет времени, затрачиваемого на разработку АСПД. Показано, что предполагаемый эффект от применения искусственного интеллекта в этом процессе может составить не менее 25 %.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 59853-2021. Информационные технологии. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Автоматизированные системы. Термины и определения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 16 с.
2. Зараменских Е.П. Управление жизненным циклом информационных систем: монография. Новосибирск: ЦРНС, 2014. 270 с.
3. Вендеров А.М. Проектирование ПО экономических информационных систем. М.: Финансы и статистика, 2002. 352 с.
4. О мерах по обеспечению технологической независимости и безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 30.03.2022 № 166. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/47688> (дата обращения: 11.11.2024).
5. Ватьян А.С., Гусарова Н.Ф., Добренко Н.В. Системы искусственного интеллекта. СПб.: Университет ИТМО, 2022. 186 с.
6. Остроух А.В. Введение в искусственный интеллект: монография. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2020. 250 с.
7. Бостром Н. Искусственный интеллект. Этапы. Угрозы. Стратегии; пер. с англ. С. Филина. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2016. 404 с.

**Для цитирования:** Казаков Г.В. Применение искусственного интеллекта в жизненном цикле автоматизированной системы подготовки данных управления летательными аппаратами // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 1 (25). С. 65–76.

## APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN LIFE CYCLE OF AUTOMATED AIRCRAFT CONTROL DATA PREPARATION SYSTEM

G.V. KAZAKOV, Cand. Sc.

4th Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia,  
29, M.K. Tikhonravova str., Korolev, Moscow Region, 141092, e-mail: kgv.64@mail.ru

The article reveals the issues of using artificial intelligence in the life cycle of automated systems for preparing aircraft control data. Currently, there is a delay in creating such systems and putting them into operation. The reasons for this are the insufficient degree of automation of the design processes, development of design documentation, testing and maintenance of the system. The proposed universal life cycle management system for a data preparation system is based on the use of artificial intelligence and consists of a set of automated workplaces: system design, programming, testing and maintenance of the system. The time spent on developing the system is calculated, and the expected effect of using artificial intelligence in this process is shown.

*Keywords:* automated workstation, automated data preparation system, life cycle, aircraft, programming, design, maintenance, testing

Поступила в редакцию/received: 14.11.2024; после рецензирования/revised: 25.11.2024;  
принята/accepted: 27.11.2024

**ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ДОЗИРОВАНИЯ РУДНОГО СЫРЬЯ  
В ДОЗИРОВОЧНО-СМЕСИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ  
АГЛОМЕРАЦИОННОЙ ФАБРИКИ**

В.И. БОБКОВ<sup>1</sup>, д-р. техн. наук, А.А. БЫКОВ<sup>1</sup>, канд. пед. наук,  
В.А. ОРЕХОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, С.В. НЕЗАМАЕВ<sup>2</sup>, ген. директор

<sup>1</sup>Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в Смоленске,  
214013, Смоленск, Энергетический проезд, 1, e-mail: alex1by@mail.ru

<sup>2</sup>АО «Первая горнорудная компания»,  
109004, Москва, ул. Николоямская, 40/22, стр. 4, e-mail: pgrk@armz.ru

© Бобков В.И., Быков А.А., Орехов В.А.,  
Незамаев С.В., 2025

В статье представлена математическая модель расчета времени дозирования рудного сырья как основа создания программного комплекса автоматизации работы смесителей дозировочных комплексов отечественных горнорудных предприятий. Применение разработанной модели дает возможность проектировать современные дозировочно-смесительные комплексы для получения необходимого качества рудного сырья при минимальном времени смешивания, что существенно снижает простой технологического оборудования и тем самым повышает энергоэффективность агломерационных фабрик. Отмечено, что представление формы смесителя в виде ячеистой структуры позволило обеспечить неизменность состава рудного материала в процессе смешивания и при этом определить оптимальный закон движения его частиц. При использовании разработанного программного комплекса брак в составе шихты снизился на 11 %, скорость ссыпания сырья увеличилась на 17,4 %, а время общего простоя оборудования сократилось в 1,37 раза.

*Ключевые слова:* программный комплекс, математическая модель, рудное сырье, дозировочно-смесительный комплекс, автоматизированные системы управления, численные методы, вычислительный элемент.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-77-87**

### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время для улучшения качества выплавляемого сырья в отечественной горно-обогачительной индустрии необходимо обеспечить производство высококачественной шихты. К основным технологическим операциям, характеризующим протекание процесса на агломерационной машине, относятся окомкованные шихты, подача и загрузка ее на спекательные тележки, зажигание слоя шихты, ее спекание и охлаждение агломерата на охладителе [1].

До сих пор отсутствует возможность проведения анализа рудного сырья для формирования шихты непосредственно перед ее загрузкой в бункер дозатора, при этом на практике загружаемый материал нередко может различаться по химическому составу [2], что существенно усложняет моделирование и автоматизацию данного процесса.

Для большинства автоматизированных систем в качестве объекта управления можно рассматривать технологическое оборудование, реализующее технологический процесс, и основные материальные средства, определяющие химические и физические преобразования производственного объекта [3]. Одной из основных особенностей технологического объекта является поточность выполняемых им операций, что способствует высокому уровню его автоматизации. Другая особенность связана с возможностью декомпозиции процесса на ряд последовательных отдельных технологических операций, характеризующихся определенными задаваемыми критериями [4]. Разработка автоматизированных систем управления требует анализа указанных технологических процессов с целью определения необходимого объема информации для оперативного контроля и выработки наиболее эффективных управляющих воздействий. Технологический процесс загрузки рудного сырья следует рассматривать как последовательность ряда операций по подаче шихты и постели из приемных бункеров, включая укладку их на агломерационную ленту. В результате управления должна быть исключена возможность опорожнения или переполнения бункеров, а при укладке на агломерационную ленту – обеспечено равномерное уплотнение при заданной его высоте. Основные контролируемые параметры в процессе загрузки – это расходы шихтовых материалов, уровень в бункерах и откос шихты верхнего слоя. Наиболее трудоемкой является задача поддержания стабильного уровня в загрузочных бункерах верхнего и нижнего слоев [5]. Эта задача усложняется тем, что время перемещения шихты от приемного бункера до загрузочного составляет около восьми минут и управляющее воздействие на вибрационный питатель поступает с соответствующим запаздыванием.

На зарубежных аглофабриках, особенно в Японии, где достигнут наиболее высокий уровень техники в области разработки автоматизированных систем управления агломерационным производством, вопрос разработки систем решается в направлении использования микропроцессорной техники, прежде всего для локальных систем управления с дальнейшим их объединением в системы более высокого уровня, выполняющие функции координации и связи со смежными производствами [6]. При этом следует отметить, что изготавливаемые фирмами-поставщиками системы имеют весьма высокую надежность и не требуют специального обслуживания.

В нашей стране первая автоматизированная система, реализующая процесс управления оборудованием для приемки и подготовки рудного сырья в агломерационном производстве, была внедрена на Челябинском металлургическом заводе в 1973 году. В состав объекта управления вошли три агломерационные машины с площадью спекания 62,5 м<sup>2</sup> каждая. В качестве средств вычислительной техники использована аналоговая вычислительная машина «Шихта». Исходную информацию о составе рудного сырья на основе регламентированного химического анализа технологу приходилось вводить вручную. На основе постоянной индикации и регистрации сверялись данные о расчетных и фактических значениях расхода материалов [7]. При этом многие процессы автоматизации носили условный характер и требовали постоянного участия обслуживающего персонала, что во многом было связано с невысокой вычислительной мощностью имевшейся на тот момент микропроцессорной техники.

При наличии достаточного выбора технических средств вычислительной техники до настоящего времени не создано достаточно полное математическое обеспечение, включая математические модели технологических процессов и

разработанные на их основе алгоритмы для реализации в программном обеспечении АСУ ТП.

С целью улучшения однородности шихты и уменьшения времени смешивания необходимо разработать математическую модель исследования функционирования дозаторов дозирочно-смесительных комплексов. Такая модель должна выработать оптимальный закон движения и смешивания частиц сырья в смесителе, что позволит улучшить характеристики уже существующих смесителей, а также определить технические параметры вновь разрабатываемых устройств. На данный момент не существует методов, позволяющих решить указанные задачи.

Математическая модель дозирочно-смесительного процесса должна описывать зависимости между его основными параметрами, существенно важными при рассмотрении его как объекта автоматизации. С этой целью применяют либо статистические методы исследования, основанные на обработке (в основном машиной) большого количества опытных данных, либо аналитические методы [8]. Оба метода одинаково правомерны, причем второй, вероятно, более сложен, однако именно при помощи аналитического подхода могут быть выявлены наиболее общие закономерности процесса и глубоко проанализированы его свойства. Математическое описание дозирочно-смесительного процесса позволяет качественно исследовать основные его показатели и возможные регулирующие воздействия, а в итоге разработать обоснованные алгоритмы управления процессом.

Целью настоящей работы является разработка математической модели расчета времени дозирования рудного сырья, обеспечивающей улучшение функционирования дозирочно-смесительных комплексов и возможности разработки программного комплекса, автоматизирующего исследуемый технологический процесс.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основе построения данной математической модели лежит представление смесителя в виде вычислительных ячеек, которые занимает смешиваемый рудный материал. Параметры ячеек должны обеспечивать неизменный состав смешиваемых материалов в рамках одной ячейки. Диаметр диафрагмы смесителя можно определить на основании соотношения

$$F = \frac{Q}{tV\gamma}, \quad (1)$$

где  $F$  – площадь высыпающего отверстия смесителя;  $Q$  – масса дозируемой единицы сырья;  $t$  – время высыпания единицы сырья на агломерационную ленту;  $V$  – средняя скорость высыпания рудного сырья из диафрагмы смесителя.

Из формулы (1) можно выразить время высыпания рудного сырья, представив площадь высыпаемого отверстия  $F$  через допустимую погрешность дозирования сырья  $Q_c$ , высоту падения сырья  $h$ , коэффициент внутреннего трения  $\mu$  и среднюю скорость  $V$ :

$$t = \frac{Q}{Q_c} \frac{\mu}{g} \left( \sqrt{V^2 + 2gh} - V_i \right). \quad (2)$$

Полученное соотношение позволяет определить время высыпания рудного материала при наличии у смесителя одной диафрагмы. Если же диафрагм несколько, то

расчет производится для каждой отдельно, а суммирование полученных времен дозирования дает общий параметр дозирочно-смесительного комплекса.

Построение рассматриваемой модели предполагает введение нескольких ограничений, среди которых наиболее важны реализация выгрузки рудного сырья после завершения смешивания, исключение из процесса моделирования влияния окружающей среды и рассмотрение исключительно стабильного состава сырьевых элементов. Базовыми компонентами рассматриваемой модели являются анализ физической системы взаимодействия поля элементов рудного материала, размещаемых в дозирочном смесителе, и поля сил, действующих со стороны механических компонентов смешивающего устройства. В результате процесс моделирования можно разделить на несколько стадий, а именно:

- задание исходного поля сил и поля частиц;
- расчет действия поля сил на поле частиц;
- оценка качества смешивания;
- уточнение параметров поля сил и поля частиц на основе полученных оценок;
- повторный расчет с целью определения улучшения или ухудшения первоначальных критериев модели.

Основные виды питателей, используемые в смесительных установках, являются уже готовыми изделиями, поэтому первоначальная задача моделирования сводится к расчету времени дозирования. Управление дозатором определяется неаналитической функцией [9], зависящей от времени и имеет вид:

для разгрузки:

$$U_p(t) = \begin{cases} q_{\max} & \text{при } p_T(t) < 0,8p_3 \\ (q_{\max} - q_{\min})(1 + \cos 0,57\omega t) / 2, & \text{при } 0,8p_3 \leq p_T(t) \leq 0,9p_3 \\ q_{\min} & \text{при } 0,9p_3 < p_T(t) < p_3 \\ 0 & \text{при } p_3 \leq p_T(t) \end{cases}, \quad (3)$$

для загрузки:

$$U_H(t) = \begin{cases} q_{\max} & \text{при } p_3 - p_T(t) > 0 \\ 0 & \text{при } p_3 - p_T(t) \leq 0 \end{cases}, \quad (4)$$

где  $p_3$  – заданный вес рудного сырья;  $p_T(t)$  – текущий вес сырья в дозаторе;  $q_{\max}$  и  $q_{\min}$  – максимальный и минимальный расход сырья;  $\omega$  – частота колебаний дозатора.

В представленной модели оценка качества смешивания производится на основе следующих критериев.

Для оценки микропараметров смеси введем критерий минимума неоднородных участков, который будем рассчитывать по формуле

$$K = \sum_{i=1}^N b_i n_i \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $N$  – количество частиц наибольшей концентрации  $N = \max_{1 \leq j \leq k} \{N_j\}$ ;  $b_i$  – коэффициент учета размера неоднородностей;  $n_i$  – количество участков неоднородностей.

Предельное значение данного критерия, больше которого полученные результаты расчета считаются заведомо неприемлемыми, будем устанавливать согласно выражению

$$K_{\max} = \sum_{j=1}^m b_{N_j}. \quad (6)$$

Для анализа параметров макрооднородности рационально использовать весьма распространенный энтропийный критерий. При разработке цифровых систем расчета можно воспользоваться опытом других разработчиков при формировании программного кода данного критерия, что существенно облегчает поставленную задачу [10]. Для критерия неоднородных участков необходимо самостоятельно сформировать программный алгоритм, так как использование обоих этих критериев позволит получить достаточно объективный анализ влияния поля частиц на процессы, протекающие внутри дозирочных смесителей.

Определение значений энтропийного критерия будет осуществляться в соответствии с формулой

$$H_j = - \sum_{l=1}^m \sum_{i=1}^{n_l} \frac{n_{lij}}{n_{li}} \log_k \left( \frac{n_{lij}}{n_{li}} \right) \rightarrow \max, \quad (7)$$

где  $m$  – параметр, определяющий размерность поля элементов рудного материала;  $n_l$  – количество контрольных срезов материала;  $n_{lij}$  – число элементов  $j$ -й разновидности рудного сырья в  $i$ -м срезе поля элементов;  $n_{li}$  – суммарное количество элементов сырья в  $i$ -м сечении;  $k$  – количество химически отличающихся компонентов сырья, участвующих в процессе смешивания.

Максимальные и минимальные значения данного критерия будем определять по выражениям:

$$H_{j \min} = \min_{1 \leq l \leq m} \left\{ - \sum_{i=1}^{n_l} \frac{N_j}{n_l n_{li}} \log_k \left( \frac{N_j}{n_l n_{li}} \right) \right\};$$

$$H_{j \max} = - \sum_{l=1}^k \sum_{i=1}^{n_l} \frac{N_j}{n_l n_{li}} \log_m \left( \frac{N_j}{n_l n_{li}} \right).$$

Для построения модели функционирования конструкций различных смесителей и прогнозирования качества получаемого рудного сырья возьмем нормированные значения используемых критериев  $H_{H_j}$  и  $K_H$ , которые можно определить согласно приведенным ниже выражениям, так как это позволит не учитывать схему размещения загружаемых материалов в агрегате.

$$H_{H_j} = \left( H_j - H_{j \min} \right) / \left( H_{j \max} - H_{j \min} \right); \quad K_H = K / K_{\max}. \quad (8)$$

Поле элементов загружаемого сырья устанавливается с указанием конкретных границ контрольных срезов на основе технологических данных реальных конструкций смесителей. При этом поле сил задается либо на основе закона движения рудного сырья в смесителе, либо на основе базисных элементов, позволяющих осуществить процесс моделирования любых законов движения частиц. В первом случае поле сил, действующих на частицу рудного сырья, можно задать согласно формуле

$$F(x, y, z) = \sqrt{F_x^2(x, y, z) + F_y^2(x, y, z) + F_z^2(x, y, z)}, \quad (9)$$

где  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  – результирующие силы, действующие в направлении соответствующих координатных осей. Эти составляющие представим в виде:

$$F_x(x, y, z) = -mg \cos \alpha (\sin \alpha - k(x) \cos \alpha);$$

$$F_y(x, y, z) = -mg \sin \alpha (\cos \alpha - k(y) \sin \alpha);$$

$$F_z(x, y, z) = -mg(1 - k(z)),$$

где  $m$  – масса засыпанного материала в смеситель над исследуемым элементом;  $k(x)$ ,  $k(y)$  и  $k(z)$  – коэффициент трения в элементе в соответствующем направлении координатной оси, который определяется на основе коэффициентов трения между элементами сырья и трения о стенки смесителя. Необходимые для задания данного коэффициента значения можно выбрать из базы данных об образцах рудных материалов и существующих моделей смесителей [11].

Такое представление поля сил учитывает только возникающие между элементами системы силы трения и силы тяжести, действующие на рудное сырье. При этом в процессе реального движения частиц рудного сырья возникают и другие виды взаимодействия, например их столкновение. В этом случае поле сил существенно усложняется и требует дополнительных расчетов.

Предлагаемая модель вполне может учитывать дополнительные взаимодействия, если ее применять с учетом определенных условий. Во-первых, движение частиц необходимо рассматривать начиная с центральной части смесителя, где ничто не мешает движению рудного сырья и практически отсутствуют другие воздействия, кроме тех, которые обусловлены силами трения и гравитации. Во-вторых, на основе анализа движения элементов сырья моделируется местоположение частиц на различных этапах процесса смешивания рудного материала. При учете данных условий модель усложняется, так как в этом случае необходимо учесть большое число элементов, и рассматриваемый подход может быть реализован только при использовании современной вычислительной техники. Однако такой способ позволяет осуществить перебор всех элементов и получить оптимальные значения критериев за минимальное время. В случае их получения расчет заканчивается, в противном же случае выбирается новое поле сил и весь расчет повторяется. При этом из предыдущего расчета выбираются элементы, обеспечивающие получение наиболее качественной информации о происходящем процессе. Новый расчет опирается на данные элементы с целью уменьшения затрат машинного времени. На основе предложенной математической модели был разработан алгоритм, блок-схема которого представлена на рис. 1.

Данный алгоритм позволяет учесть основные параметры полей частиц и полей сил при расчете времени смешивания рудного сырья и в дальнейшем использовать его при проектировании современных дозировочно-смесительных комплексов.

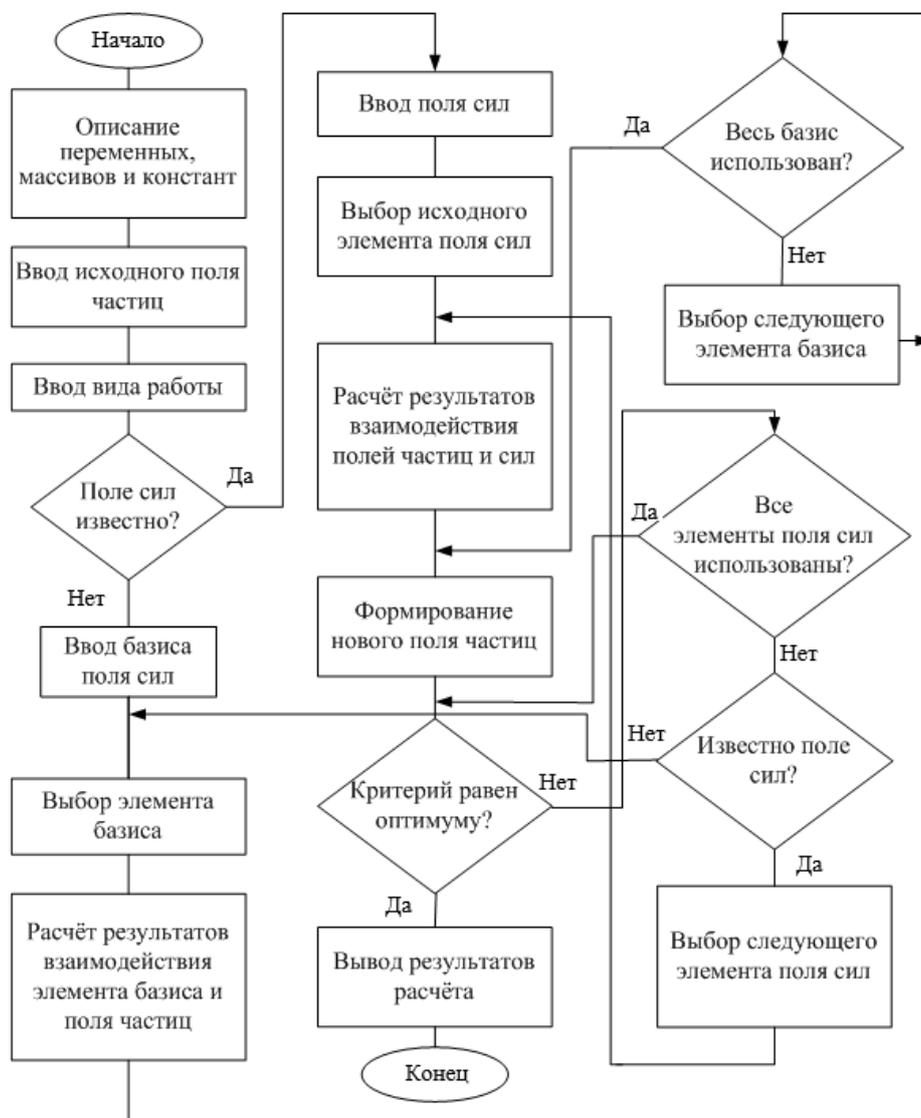


Рис. 1. Блок-схема алгоритма смешения рудного сырья

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе разработанной математической модели и представленного алгоритма была создана автоматизированная система расчета времени дозирования рудного сырья и прогнозирования качества смешивания с учетом химического состава рудного материала и технологических характеристик дозировочно-смесительных комплексов. Система была разработана с использованием языка программирования C++, как наиболее популярного при разработке промышленных систем автоматизации. Для реализации возможности функционирования автоматизированной системы расчета под управлением любой операционной системы программный код был сформирован на основе кросс-платформенного модуля Visual Code, с которым активно взаимодействуют многие современные программисты, работающие в области создания промышленных АСУ ТП.

Разработанный автоматизированный расчетный комплекс обладает многофункциональным графическим интерфейсом. Для ввода начальных данных система имеет графическую форму, представленную на рис. 2.

Рис. 2. Форма ввода первоначальных данных смесителя

Данная форма позволяет пользователю выбрать тип смесителя, и в зависимости от выбранного типа появляются поля внесения его технологических параметров. После введения эти характеристики необходимо подтвердить, чтобы система запомнила их, а пользователь мог перейти к указанию химического состава сырья. При выборе рудного сырья можно воспользоваться сведениями из встроенной в систему базы данных. Пример выбора необходимого сырья фосфоритной группы приведен на рис. 3.

Рис. 3. Форма ввода образца рудного сырья

Программный комплекс позволяет пользователю расширять имеющуюся базу данных, внося в нее сведения о различном рудном сырье и современных моделях

смесителей, а также добавлять данные, полученные в результате расчета пользовательских экспериментальных моделей дозировочных смесителей.

Для обеспечения наглядности и возможности оценки математических зависимостей цифровая система обладает возможностью графического представления результатов расчета.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

С помощью разработанного программного комплекса был осуществлен процесс моделирования и расчета функционирования промышленного пневматического смесителя С-951. Поле частиц было задано на основе технических параметров данной модели. Сопоставление имеющихся технологических данных и данных, полученных в результате работы цифровой системы, показало, что они отличались всего на 1,2 %. Это свидетельствует об адекватности предложенного метода. Кроме того, из расчета следует, что достижение приемлемой скорости смешивания возможно при наличии в смесителе четырех сопел, при этом качество получаемого материала соответствует значению эмпирического критерия  $1,4 \cdot 10^{-4}$ , а критерий минимума неоднородных участков принимает значение 0,975. Время смешивания автоматизированной системой оказалось равным 3,4 мин, что соответствует технической документации данного смесителя, согласно которой этот показатель составляет 3–4 мин в зависимости от типа рудного сырья. Внедрение разработанной автоматизированной системы расчета продолжительности процесса смешивания рудных материалов на одном из предприятий АО «Первая горнорудная компания» позволило выявить конструктивные недостатки имеющихся смесителей. На основе полученных данных усилиями инженерного состава предприятия были произведены соответствующие технологические доработки одного из смесителей, представленного в качестве экспериментального образца. В результате скорость смешивания увеличилась на 24,56 % в сравнении со штатными агрегатами, при этом брак в составе шихты снизился на 11 % в модифицированном образце. Кроме того, применение представленной автоматизированной системы обеспечило значительное ускорение необходимых расчетов с уменьшением их погрешности, а также сократило долю ручного труда и снизило продолжительность интервалов внутрицикловых простоев оборудования.

Разработанный программный комплекс может быть положен в основу современных автоматизированных систем управления дозировочно-смесительных линий металлургического предприятия.

### **БЛАГОДАРНОСТИ**

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № FSWF-2023-0012.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Shvydkii V.S., Fatkhutdinov A.R., Devyatykh E.A., Devyatykh T.O., Spirit N.A. On Mathematical Modeling of Layer Metallurgical Furnaces and Aggregates. Report 2 // *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. 2017. V. 60. № 1. P. 19–23.
2. Tesser R., Santacesaria E. Revisiting the Role of Mass and Heat Transfer in Gas-solid Catalytic Reactions // *Processes*. 2020. V. 8. № 12. P. 1599.
3. Длин М.И., Черновалова М.В., Соколов А.М., Моргунова Э.В. Нечеткая динамическая онтологическая модель для поддержки принятия решений по управлению энергоемкими системами на основе прецедентов // *Прикладная информатика*. 2023. Т. 18. № 5. С. 59–76.

4. Бобков В.И., Орехов В.А. Особенности методики определения теплофизических свойств фосфоритового агломерата // *Современные наукоемкие технологии*. 2022. № 10-1. С. 59–63.
5. Tian H., Pan J., Zhu D., Wang D., Xue Y. Utilization of Ground Sinter Feed for Oxidized Pellet Production and its Effect on Pellet Consolidation and Metallurgical Properties // *11th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*, 2020. P. 857–866.
6. Vereykina E.K., Orekhov V.A. Study of Thermal Deformations in Iron ore Raw Materials at high Temperature Roasting // *AIP Conference Proceedings*. 2023. V. 2999. № 1. P. 020050.
7. Лопатина Т.Д., Тихонов М.Р., Чудинова М.А. Сравнительный анализ методов управления временем для целей автоматизации технологических процессов // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2023. № 4. С. 82–85.
8. Пучков А.Ю., Прокимнов Н.Н., Рысина Е.И., Шутова Д.Ю. Нейрорегулятор комплексной технологической системы переработки рудных отходов // *Прикладная информатика*. 2023. Т. 18. № 5. С. 91–105.
9. Hannemann F., Bradfield M., Mahdi M., So L.L.C., Metcalfe D. Impact of Air Granulation on the Ferrochrome Value Chain in Metallurgical Smelter Complexes // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018. V. 118. № 6. P. 625–630.
10. Borisov V., Bulygina O., Vereikina E. The Use of Coevolutionary Algorithms for Optimizing the Operating Regimes of the Roasting Conveyor Machine // *Journal of Applied Informatics*. 2023. V.18. № 3. P. 52–60.
11. Орехов В.А., Бобков В.И., Панченко С.В. Разработка информационной системы расчета, накопления информации и паспортизации теплофизических свойств фосфоритов // *Программные продукты и системы*. 2022. Т. 35. № 3. С. 502–508.

**Для цитирования:** Бобков В.И., Быков А.А., Орехов В.А., Незамаев С.В. Программная реализация математической модели расчета времени дозирования рудного сырья в дозирочно-смесительном комплексе агломерационной фабрики // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 77–87.

## **SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE DOSING TIME OF ORE RAW MATERIALS IN THE DOSING AND MIXING COMPLEX OF AN AGGLOMERATION FACTORY**

V.I. BOBKOV<sup>1</sup>, Dr. Sc., A.A. BYKOV<sup>1</sup>, Cand. Sc.,  
V.A. OREKHOV<sup>1</sup>, Cand. Sc., S.V. NEZAMAEV<sup>2</sup>, DG

<sup>1</sup>Branch of the National Research University «MEI» in Smolensk,  
1, Energeticheskiy proezd, Smolensk, 214013, e-mail: alex1by@mail.ru

<sup>2</sup>JSC «First Mining Company»,  
40/22, bild. 4, Nikoloyamskaya str., Moscow, 109004, e-mail: pgrk@armz.ru

The paper presents a mathematical model for calculating the dosing time of ore raw materials, which is the basis for creating a software package for automating the operation of mixers of dosing complexes of domestic mining enterprises. The application of the

developed model makes it possible to design modern dosing and mixing complexes that ensure the necessary quality of ore raw materials with minimal mixing time, which significantly reduces the downtime of technological equipment and thereby increases the energy efficiency of sintering plants. It is noted that the representation of the mixer shape in the form of a cellular structure made it possible to ensure the immutability of the composition of the ore material during mixing and at the same time determine the optimal law of motion of its particles. The use of the developed software package reduced the scrap in the composition of the charge by 11%, increased the rate of pouring of raw materials by 17.4 % and reduced the total downtime of the equipment by 1.37 times.

*Keywords:* software package, mathematical model, ore raw materials, dosing and mixing complex, automated control systems, numerical methods, computational element.

Поступила в редакцию/received: 11.11.2024; после рецензирования/revised: 25.11.2024;  
принята/accepted: 27.11.2024

УДК 004.89

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ МЕДИЦИНСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В ТВЕРСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ МЕДИЦИНСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

Л.В. ЧИЧАНОВСКАЯ, д-р мед. наук, О.Н. БАХАРЕВА, канд. мед. наук

Тверской государственный медицинский университет,  
170100, Тверь, ул. Советская, 4, e-mail: bakharevaon@tvghmu.ru

© Чичановская Л.В., Бахарева О.Н., 2025

Цифровые технологии не только являются устойчивой платформой для диагностического поиска многих заболеваний, но и помогают реализовать конкретные терапевтические и хирургические стратегии. Распространение новых инфекционных вызовов заставило медицинское сообщество задуматься о дистанционных формах диагностики, обработки данных и принятия врачебных решений. Благодаря современным возможностям применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) на базе Тверского государственного медицинского университета активно используются разные его направления: генеративный ИИ в работе с текстом, генеративный ИИ для работы с изображениями, обработка больших массивов информации, решения без заранее заданного алгоритма, распознавание образов, звуков, симптомов.

*Ключевые слова:* цифровые технологии, медицина, искусственный интеллект.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-87-92**

### **ВВЕДЕНИЕ**

В современном мире невозможно проведение лечебно-реабилитационных мероприятий без цифровых технологий, которые применяются для диагностического поиска многих заболеваний, а также помогают в реализации конкретных терапевтических и

хирургических стратегий, обработке больших массивов данных, а следовательно, и в формировании мощной научной базы для дальнейших клинических и фундаментальных исследований в медицинской науке [1–5].

Кроме того, новые инфекционные вызовы заставили медицинское сообщество задуматься о дистанционных формах диагностики, обработки данных и принятия врачебных решений. Если в остром периоде соматических и хирургических заболеваний, в том числе инфекционных, разработаны порядки и клинические рекомендации по медицинскому сопровождению больных и оказанию лечебно-реабилитационной помощи, закреплена роль мультидисциплинарной бригады, то в раннем и позднем восстановительном периоде нет четких рекомендаций по амбулаторному сопровождению данной когорты больных, в том числе в дистанционном режиме, что позволило бы учесть как многие медицинские, так и социально-бытовые аспекты ведения пациента, а также значимо повлиять на качество его жизни в новых условиях, возникших в связи с наличием заболевания. В период активного развития современных цифровых технологий особое значение приобретает разработка новых форм диагностики и лечения заболеваний, в частности, при помощи дистанционных технологий, которые являются мощным скрининговым инструментом своевременного выявления проблем, а также значимым фактором формирования мотивации и преемственности в лечении [6–8].

В связи с этим Тверской государственный медицинский университет (ФГБОУ ВО Тверской ГМУ), являясь флагманом научных медицинских разработок и достижений не только в Тверском регионе, но и в РФ, активно занимается поиском и внедрением новых технологических решений в данном направлении. Это стало возможным не только благодаря собственным клиническим и фундаментальным разработкам, но и тесному сотрудничеству с крупным цифровым концерном «Платформа Третье Мнение» – производителем цифровых сервисов на основе технологий искусственного интеллекта для платформы «Яндекс.Здоровье» с возможностью применения разработок Yandex Cloud.

Цель статьи состоит в оценке опыта применения медицинских цифровых технологий на базе ФГБОУ ВО Тверской ГМУ. В основу работы положен анализ применения основных достижений цифровых технологий в указанном вузе.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Благодаря современным возможностям применения технологий ИИ на базе нашего университета активно применяются разные его направления, а именно:

- генеративный ИИ в работе с текстом;
- генеративный ИИ для работы с изображениями;
- обработка больших массивов информации;
- решения без заранее заданного алгоритма;
- распознавание образов, звуков, симптомов.

Искусственный интеллект помогает разрабатывать персонализированные планы лечения путем анализа обширных наборов данных. Стратегии лечения, основанные на ИИ, привели к улучшению результатов лечения пациентов до 30 %, поскольку они могут с большей точностью предсказывать реакцию пациентов на различные методы лечения, сводя к минимуму метод проб и ошибок и оптимизируя эффективность терапии.

Применение технологий на основе ИИ (анализ обширных баз данных) ускоряет процессы поиска лекарств. Искусственный интеллект может сократить сроки разработки лекарств до 50 % благодаря своей способности определять потенциальные лекарственные мишени и прогнозировать эффективность лечения.

Искусственный интеллект улучшает качество медицинского образования посредством интерактивного моделирования и виртуальной реальности. При использовании стажерами-медиками образовательных инструментов на основе ИИ на 40 % повышается эффективность приобретения и закрепления соответствующих навыков. Механизмы обратной связи в реальном времени, предоставляемые ИИ, также помогают выявить пробелы в обучении и способствуют их постоянному совершенствованию.

Искусственный интеллект помогает в планировании хирургического вмешательства, анализируя данные пациентов. При использовании ИИ количество послеоперационных осложнений уменьшается на 60 % и сокращается время пребывания больного в стационаре. Персонализированные планы реабилитации, разработанные ИИ на основе данных пациентов, привели к сокращению периода восстановления на 25 % и улучшению функциональных результатов.

Системы виртуальной реальности на базе ИИ моделируют терапевтическую среду. VR-терапия обеспечивает лечение, основанное на воздействии контролируемых стрессоров, что дает пациентам возможность испытать травматические переживания в безопасной обстановке и справиться с ними.

В соответствии с ключевыми научными приоритетами научно-технологического развития в Тверском ГМУ организованы научно-исследовательские площадки, позволяющие реализовать междисциплинарный подход по основным направлениям развития комплексного потенциала университета, таким как превентивная и персонализированная медицина, обеспечение здорового долголетия (Указ Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529).

В рамках развития важнейших наукоемких критических технологий в Тверском ГМУ развиваются следующие направления, обеспечивающие разработку принципов биомедицинских и когнитивных технологий здорового и активного долголетия:

«Комплексные подходы и междисциплинарное взаимодействие в диагностике и лечении полиорганных нарушений у больных с дисплазией соединительной ткани»;

«Разработка и совершенствование комплексной терапии стоматологических заболеваний с применением нанотехнологий»;

«Комплексная морфофункциональная и молекулярно-генетическая оценка адаптивно-компенсаторных реакций организма при воздействии неблагоприятных факторов».

«Разработка медицинского оборудования и методик, направленных на совершенствование оказания медицинских услуг населению» – еще один вектор развития, соответствующий критическим технологиям разработки медицинских изделий нового поколения, включая биогибридные, бионические технологии и нейротехнологии.

«Комплексная экспериментальная оценка эффективности и безопасности новых лекарственных средств, исследования экспериментальной фармакокинетики, включая оценку метаболизма и распределения по органам и тканям, включая проведение метаболомических исследований» – направление, обеспечивающее соответствие критическим технологиям разработки лекарственных средств и платформ нового поколения (биотехнологических, высокотехнологичных и радиофармацевтических лекарственных препаратов).

Другое направление – «Характеристика микробиоты человека и выделяемых метаболитов (простых газовых сигнальных молекул, короткоцепочечных жирных кислот) для анализа регуляции внутри и межклеточной коммуникации» – обеспечивает соответствие развитию критических технологий персонализированного, лечебного и функционального питания для здоровьесбережения.

Сквозным технологиям искусственного интеллекта в отраслях экономики, социальной сферы (включая сферу общественной безопасности) и в органах публичной власти соответствуют направления «Цифровые методики индентификации личности и распознавания образов в судебно-медицинской экспертизе» и «Дистанционные компьютерные технологии в медицинской реабилитации».

Интеграция ИИ в неврологическую практику включает поддержку принятия клинических решений, совершенствование традиционных методов диагностики (МРТ, КТ, ЭЭГ, ЭНМГ и др.), тем самым улучшая их способность выявлять такие состояния, как инсульт, отек диска зрительного нерва и диабетическая ретинопатия, прогнозировать результаты посредством интерпретации методов диагностики. Так, инструменты на основе ИИ показали точность до 95 % при обнаружении геморрагических инсультов с помощью компьютерной томографии, что способствует раннему выявлению и своевременному вмешательству, а значит, снижению уровня смертности и хронической инвалидности, что может быть масштабировано в отношении военной травмы.

Алгоритмы ИИ анализируют данные нейровизуализации, чтобы определить характеристики поражения и предсказать результаты восстановления. Точная медицина адаптирует стратегии реабилитации на основе индивидуальных профилей пациентов, оптимизируя восстановление и функциональные результаты.

В условиях агрессивного роста инфекционных заболеваний очевидной стала необходимость изучения психоэмоциональной сферы у больных с постинфекционным синдромом различной природы. Эпидемия коронавирусной инфекции, проявляясь системными многополярными механизмами течения, прогрессирования и формирования длительных постковидных нарушений, вынудила клиницистов более пристально изучать последствия нейроинфекций, неуклонное распространение которых происходит на современном этапе. Подтверждением этому служит рост психоэмоциональных нарушений у пациентов с постинфекционной астенией. Поэтому особенно важна разработка превентивных механизмов для ранней диагностики таких нарушений и их мониторинга у людей трудоспособного возраста в связи с высоким уровнем временной нетрудоспособности и разнообразием клинических проявлений вплоть до аффективных эквивалентов у этой категории больных. Зачастую наличие тревожно-депрессивных нарушений и когнитивного диссонанса становится главным препятствием к проведению активных реабилитационных мероприятий, значимо снижая реабилитационный потенциал и тем самым нивелируя способность к восстановлению соматических функций.

На платформе MeDiCase уже успешно функционируют симптом-чекеры, которые выявляют вероятность постинфекционного/поствакцинального синдрома, постковидного синдрома, а также оценивают в целом уровень здоровья населения. Для реализации идеи платформа MeDiCase и Центр постковидной реабилитации клиники ФГБОУ ВО «Тверской ГМУ» предоставляют свои площадки для размещения симптом-чекера и обеспечивают доступ к пациентам для апробации готового симптом-чекера.

Методика дистанционного скрининга и анализа психоэмоциональных нарушений больных с постинфекционным синдромом включает непосредственный опрос пациентов, обратившихся на уровне регистратуры по поводу заболевания, проводимый с помощью специально разработанного компьютерного приложения путем сплошного исследования. В медицинской информационной системе, подключенной к сети интернет, реализованы автоматизированные методы тестирования пациента при удаленном мониторинге (например, с помощью специальных мобильных приложений), телемедицинский сервис. Данные заносятся в программу либо самим респондентом, либо интервьюером – это зависит от задачи, ситуации и состояния больного. Все предлагаемые вопросы закрытого типа. Обработка данных выполняется автоматически с применением байесовского анализа. Особенность данного методического алгоритма заключается в том, что он может быть масштабирован на разные сферы и направления соматических заболеваний.

Программа тестирования пациента основана на древовидном алгоритме построения вопросов, который дает возможность на доврачебном этапе выявить ранние симптомы возникновения тревожно-депрессивных и когнитивных нарушений как лиц гражданского персонала, так и военнослужащих. Дерево принятия решений включает в себя элементы двух типов: узлы (node) и листья (leaf) и дает представление о действиях и их последствиях в виде упорядоченной иерархии. При его построении можно выявить оптимальный алгоритм действий для решения заданной проблемы. Апробация программы MeDiCase, проведенная на базе клиники Тверского ГМУ как системы поддержки принятия врачебных решений, свидетельствует о достаточном для практики состоянии разработок программного и аппаратного обеспечения, в том числе для его внедрения в военной медицине на амбулаторном этапе.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование показало, что применение специальных медицинских сервисов на основе технологий искусственного интеллекта и рассмотренная система поддержки принятия врачебных решений обладают широкими возможностями для удаленного сбора и анализа симптомов пациентов, в том числе военнослужащих, получивших служебный и боевой стресс или имеющих последствия военной травмы. Результаты анализа свидетельствуют о перспективности дальнейших исследований внедрения технологий искусственного интеллекта для осуществления мониторинга, диагностики и оказания медико-психологической помощи больным.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Глущенко В.М., Пронькин Н.Н. Междисциплинарный подход в исследовании сложных систем // *Экономические исследования и разработки*. 2020. № 4. С. 106–113.
2. Rozenblum R., Rodriguez-Monguio R., Volk L.A., Forsythe K.J., Myers S., McGurrin M., Seoane-Vazquez E. Using a Machine Learning System to Identify and Prevent Medication Prescribing Errors: a Clinical and Cost Analysis Evaluation // *The Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety*. 2020. V. 46. № 1. P. 3–10.
3. Carracedo-Reboredo P., Liñares-Blanco J., Rodríguez-Fernández N., Cedrón F., Novoa F.J., Carballeda A., Fernandez-Lozano C. A Review on Machine Learning Approaches and Trends in Drug Discovery // *Computational and structural biotechnology journal*. 2021. V. 19. P. 4538-4558.

4. Ghassemi M., Naumann T., Schulam P., Beam A.L., Chen I.Y., Ranganath R.A. A Review of Challenges and Opportunities in Machine Learning for Health // *AMIA Summits on Translational Science Proceedings*. 2020. V. 2020. P. 191–200.

5. Machine Learning Lab – Intelligence Artificielle pour tous! URL: <https://en.mlab.ai/communications/associated-press-uses-machine-learning-automate-writing-corporate-financial-reports> (дата обращения: 02.12.2024).

6. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «Нейротехнологии и искусственный интеллект» в России. URL: <https://digital.gov.ru/ru/documents/6658/> (дата обращения: 02.12.2024).

7. О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 10.10.2019 № 490. URL: <https://base.garant.ru/72838946/?ysclid=m47bt08uqm993847192/> (дата обращения: 02.12.2024).

8. Rahmani A.M., Yousefpoor E., Yousefpoor M.S., Mehmood Z., Haider A., Hosseinzadeh M., Ali Naqvi R. Machine Learning (ML) in Medicine: Review, Applications, and Challenges // *Mathematics*. 2021. V. 9. № 22. P. 2970.

**Для цитирования:** Чичановская Л.В., Бахарева О.Н. Перспективы применения цифровых медицинских технологий в Тверском государственном медицинском университете // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 87–92.

## **PROSPECTS FOR THE USE OF DIGITAL MEDICAL TECHNOLOGIES IN TVER STATE MEDICAL UNIVERSITY**

L.V. CHICHANOVSKAYA, Dr. Sc., O.N. BAKHAREVA, Cand. Sc.

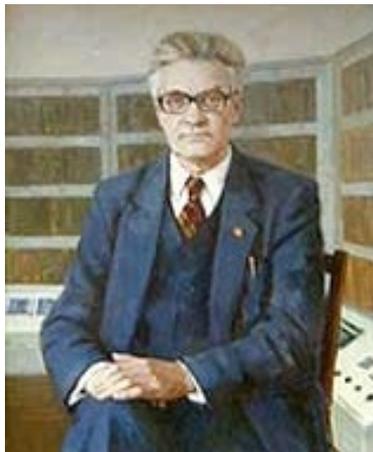
Tver State Medical University,  
4, Sovetskaya str., Tver, 170100, e-mail: bakharevaon@tvngmu.ru

Digital technologies have become a stable platform not only for diagnostic search of many diseases, but also help to implement specific therapeutic and surgical strategies. The spread of new infectious challenges has forced the medical community to think about remote forms of diagnostics, data processing and medical decision-making. Thanks to modern capabilities of artificial intelligence (AI) technologies, various areas of it are actively used at the Tver State Medical University: generative AI in working with text, generative AI for working with images, processing large arrays of information, decisions without a predetermined algorithm, recognition of images, sounds, symptoms.

*Keywords:* digital technologies, medicine, artificial intelligence.

Поступила в редакцию/received: 25.11.2024; после рецензирования/revised: 02.12.2024;  
принята/accepted: 09.12.2024

## ХРОНИКА



### **МАТЕРИАЛЫ НАУЧНОГО СЕМИНАРА «ЗОЛОТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ», посвященного памяти и деятельности выдающегося российского математика академика АН СССР**

**Евгения Васильевича Золотова**

10–11 октября 2024, Тверь

Тверской государственной технической университет

Организаторами научного мероприятия выступили ТвГТУ, Российская ассоциация искусственного интеллекта, Российская ассоциация нечетких систем и мягких вычислений, ЦНИИ ВКС Минобороны России.

В программу двухдневного семинара включено проведение круглых столов по темам «Перспективные направления исследований в области математического моделирования и применения методов искусственного интеллекта в теории и практике беспилотных систем» и «Привлечение молодых специалистов к научным исследованиям: проблемы и пути решения».

Свои доклады по тематике семинара представили ученые ТвГТУ, ЦНИИ ВКС Минобороны России, ТГМУ, Военной академии ВКО, других ведущих университетов России, научных учреждений, институтов РАН.

УДК 004.942

### **ВОЗМОЖНОСТИ ЦЕНТРАЛЬНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКИХ СИЛ МИНОБОРОНЫ РОССИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ**

**А.И. БАЙБАКОВ, канд. техн. наук, М.Ю. КОЧЕТЫГОВ**

Центральный научно-исследовательский институт  
Воздушно-космических сил Минобороны России,  
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 32, e-mail: nicpvotver@mail.ru

© Байбаков А.И., Кочетыгов М.Ю., 2025

На основе подхода, реализуемого в методе анализа классификаций, осуществлено структурирование направлений и тематики исследований, осуществляемых в головной научно-исследовательской организации по проблемам строительства

противовоздушной (воздушно-космической) обороны страны – Центральном научно-исследовательском институте Воздушно-космических сил Министерства обороны Российской Федерации (ЦНИИ ВКС) в интересах привлечения к исследованиям талантливых молодых ученых и специалистов – выпускников высших учебных заведений. Рассмотрены фундаментальные дисциплины, изучаемые в образовательных учреждениях и представляющие интерес для решения проблем обороны и безопасности государства. Представлены результаты выступлений руководителей ЦНИИ ВКС на VI научном семинаре «Золотовские чтения». Обобщены данные о существующем научно-техническом потенциале ЦНИИ ВКС и перспективах его развития для формирования целевой мотивации у будущих молодых ученых.

*Ключевые слова:* научные исследования, воздушно-космическая оборона, молодые ученые и специалисты, математическое моделирование, средства воздушно-космического нападения, измерительные комплексы, характеристики объектов.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-93-102**

## **ВВЕДЕНИЕ**

Тверским государственным техническим университетом (ТвГТУ) совместно с ЦНИИ ВКС, Российской ассоциацией искусственного интеллекта и Российской ассоциацией нечетких систем и мягких вычислений проведено весьма важное и интересное научное мероприятие – VI научный семинар «Золотовские чтения», названный в честь заведующего кафедрой университета, первого доктора технических наук НИИ-2 войск ПВО страны (ЦНИИ ВКС является правопреемником НИИ-2), советского и российского математика, академика Евгения Васильевича Золотова. По представительству и темам докладов семинар становится площадкой всероссийского масштаба для обмена знаниями, обсуждения результатов научных исследований и поиска путей сотрудничества. На одном из круглых столов «Золотовских чтений» обсуждались вопросы, связанные с путями привлечения талантливой молодежи и выпускников высших учебных заведений к научно-исследовательским работам (НИР).

Актуальность рассматриваемых вопросов определяется следующими взаимосвязанными причинами:

необходимостью реализации соответствующих решений Президента Российской Федерации по интенсификации научных исследований в государстве и привлечению в науку молодежи;

существующими проблемами при поиске и приеме на работу молодых кадров, обладающих необходимым уровнем подготовки по специальностям, которые не обеспечиваются выпускниками военных академий;

сложностью современных решаемых задач в условиях западных санкций и проведения специальной военной операции.

Цель статьи – анализ научно-технического потенциала ЦНИИ ВКС в современных условиях и определение для молодых специалистов наиболее эффективных направлений военно-научных исследований, которые могут быть им интересны.

Новизна материалов исследования заключается в представленных результатах анализа научно-технического потенциала крупной научно-исследовательской организации, структурированных для формирования мотивации молодых ученых и специалистов при выборе возможностей профессионального занятия научной работой.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Происходящие в мире события, санкции против Российской Федерации, агрессивное расширение НАТО, проведение специальной военной операции особенно остро поставили вопрос о необходимости социально-экономических преобразований в стране и инновационного развития. Растущий объем информации, а также наметившаяся тенденция к расширению компетенций в профессиональной деятельности обусловили изменение требований, предъявляемых обществом к системе высшего профессионального образования в вопросах подготовки будущих специалистов. Президент Российской Федерации Владимир Владимирович Путин практически на всех мероприятиях Правительства Российской Федерации и встречах с представителями молодого поколения призывает «... развивать науку таким образом, чтобы в эту сферу потянулась заинтересованная молодежь». Вместе с тем анализ опыта ЦНИИ ВКС, материалов опубликованных социологических исследований, проводившихся в ведущих московских технических образовательных учреждениях, а также специальных исследований ученых ТвГТУ В.А. Миронова и Э.Ю. Майковой [1] показывают следующее.

На вопрос о желании заниматься научной деятельностью в университете только 5 % из 250 респондентов ответили, что любят заниматься научной деятельностью и делают это по собственной инициативе. Мотивацией тех, кто занимается наукой по принуждению, является получение хорошей оценки. Всего 6 % опрошенных считают, что молодежь может реализовать себя в научной сфере.

Основными причинами, по которым студенты не хотят заниматься этим видом деятельности, указаны отсутствие информации о НИР, неинтересная организация НИР в образовательном учреждении, отсутствие интереса, желания, материального стимула и времени.

Студенты считают, что в науке тяжело и долго добиваться результатов. На любые исследования уходит немало времени, а сейчас многие хотят осуществлять свои желания быстро и без усилий. У значительной части молодежи другие ценности, и времени на научные исследования молодые люди, как правило, не находят. Студенты, в большинстве своем, не заинтересованы в научно-исследовательской деятельности, в продвижении отечественной науки и считают это бесперспективным и малооплачиваемым занятием. Известно, что сегодня интересы значительной части современной молодежи зачастую не связаны с наукоемкими специальностями, развитием авиации и космонавтики, как это было в советское время. Предпочтения учащихся часто выражаются в их желании стать, например, бизнесменами или блогерами, специалистами в сфере банковских технологий и т.п. Такова сложность рассматриваемой проблемы привлечения выпускников высших учебных заведений и молодых специалистов к научным исследованиям [2, 3].

Конечно, активность студентов в научно-исследовательской деятельности во многом зависит от того, как организована научная работа студентов, какие формы и методы стимулирования ее активных участников практикуются для привлечения молодых специалистов и выпускников высших учебных заведений в научно-исследовательские учреждения.

Рассмотрим основные возможности ЦНИИ ВКС как научной организации, которая может представлять интерес для молодых талантливых людей, студентов, аспирантов. Для этого воспользуемся подходом метода анализа классификаций и структурируем актуальные направления исследований, проводимые в ЦНИИ ВКС, которые можно предложить для тех, кто задумывается о карьере ученого, а также силы и средства, привлекаемые для решения сложных проблем построения технической основы Воздушно-космической обороны Российской Федерации.

Особую опасность для нашего государства представляют средства воздушно-космического нападения – баллистические ракеты, беспилотная и пилотируемая авиация и авиационные средства поражения, в перспективе гиперзвуковые, воздушно-космические ударные средства и другое оружие, создаваемое в США и Европе для нанесения ударов из воздуха и космоса. Появление многих из них – это реализация научно-технических прорывов, на противодействие которым направлена деятельность ЦНИИ ВКС.

Центральный научно-исследовательский институт Воздушно-космических сил Министерства обороны Российской Федерации ведет свою историю с 1935 года и является правопреемником НИИ-2 войск ПВО страны и 2-го ЦНИИ МО. После ряда реорганизаций был сформирован ЦНИИ Войск Воздушно-космической обороны, переименованный в 2019 году в ЦНИИ Воздушно-космических сил (ЦНИИ ВКС). В настоящее время ЦНИИ ВКС – головная научно-исследовательская организация Министерства обороны, широко известный в России и за ее пределами научный центр по исследованию проблем строительства противовоздушной (воздушно-космической) обороны страны и Вооруженных Сил, Объединенной системы ПВО государств – участников Содружества Независимых Государств и систем ПВО в регионах коллективной безопасности, а также по разработке специализированных исходных данных о средствах воздушно-космического нападения иностранных государств [4].

Воздушно-космические силы – один из наиболее совершенных и наукоемких видов Вооруженных Сил Российской Федерации, объединяющий силы и средства войск противовоздушной и противоракетной обороны, военно-воздушных сил и космических войск для противоборства в воздушно-космической сфере в целях обеспечения обороны и безопасности нашего государства.

Исходя из решаемых задач и разрабатываемого вооружения, необходимо отметить, что в ЦНИИ ВКС собраны и изучаются передовые технологии и конструкторские решения, которые нашли применение не только в военной, но и в гражданской отраслях авиационного, ракетного и космического строения, робототехники и материаловедения, космической навигации, информационных технологий.

К перспективным научным направлениям, которые развивает ЦНИИ ВКС, относятся проблемы военного искусства, стратегии и тактики применения ВКС, технологические и специальные научно-технические направления.

В области развития технологий это системы с элементами искусственного интеллекта, способными получать и анализировать информацию, самообучаться и адаптироваться; ультраминиатюрные структуры с контролируемыми свойствами для синтеза конструкций и устройств; биомиметика для создания материалов, конструкций, процессов и датчиков на основе изучения объектов живой природы; компактные источники питания и широкополосная связь и т.д.

В области создания передовой ракетно-авиационной техники и вооружения перспективными являются направления, в которых используются принципиально новые методы моделирования и расчета аэродинамических характеристик гиперзвуковых летательных аппаратов, моделирования и испытания новых жаростойких материалов и покрытий, применяются авиационное и ракетное топливо и силовые установки с повышенными энергетическими характеристиками и многое другое.

Само перечисление этих направлений говорит о масштабности и сложности решаемых научных задач и проблем и позволяет сделать вывод о том, какие разработки в технике, физике, химии и математике необходимы для их решения.

Для решения такого большого комплекса научных и технических задач ЦНИИ ВКС взаимодействует с ведущими предприятиями оборонно-промышленного комплекса, научно-исследовательскими институтами и конструкторскими бюро авиационно-космической отрасли и ракетостроения, институтами Российской академии наук, московскими и тверскими высшими учебными заведениями и т.д.

В целях развития науки и укрепления научно-технического потенциала в ЦНИИ ВКС созданы специальные научные школы, диссертационные советы, трудятся десятки высококвалифицированных специалистов, кандидатов и докторов наук – выпускников ведущих московских высших учебных заведений: МГУ, МФТИ, МИФИ, МАИ, МГТУ имени Н.Э. Баумана, а также тверских университетов. Часть сотрудников являются членами экспертных советов Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России. Функционирует уникальная лабораторно-экспериментальная база, налажен полный цикл подготовки и обучения специалистов высшей квалификации в рамках очной адъюнктуры и докторантуры.

Научная школа ЦНИИ ВКС авторитетна в организациях промышленности и научно-исследовательских учреждениях. Сотрудники института достигли больших высот в науке и промышленности, стали генеральными директорами и конструкторами крупнейших оборонно-промышленных предприятий. Это генеральный конструктор Концерна воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей», Герой Труда Российской Федерации, член-корреспондент Российской академии наук Павел Алексеевич Созинов; генеральный директор Центрального научно-исследовательского радиотехнического института имени академика А.И. Берга, доктор технических наук, профессор Григорий Иванович Андреев; генеральный директор Машиностроительного конструкторского бюро «Факел» имени академика П.Д. Грушина, доктор технических наук, профессор Виктор Валентинович Доронин и многие другие.

Сложившаяся организация научной работы ЦНИИ ВКС существенно расширяет возможности молодых ученых по участию в научных конференциях и форумах, выполнению научных работ в интересах обороны и безопасности страны.

Широкий круг экспериментальных исследований в области физики, радиотехники и радиолокации в ЦНИИ ВКС проводится на собственной уникальной лабораторно-экспериментальной базе, не имеющей аналогов в мире по точности и достигаемым параметрам. Наиболее значимыми ее элементами являются [4]:

эталонный радиолокационный измерительный комплекс для изучения свойств летательных аппаратов как объектов обнаружения радиолокационными средствами;

оптический измерительный испытательный комплекс «Фотон» для исследования излучательных и лазерно-локационных характеристик летательных аппаратов в оптическом диапазоне длин волн;

стрельбовый моделирующий комплекс для исследования поражающего действия осколочно-фугасных боеприпасов и кинетического оружия;

радиоизотопный циклотрон для исследования воздействия ионизирующих излучений на элементы вооружения и военной техники;

экспериментально-моделирующий комплекс на основе стенда «башня невесомости» для испытаний элементов конструкции космических аппаратов с использованием методов маломасштабного физического моделирования в условиях, близких к невесомости;

баллистический центр для исследований методов и технологий навигационно-баллистического обеспечения управления полетом космических аппаратов.

Исследование радиолокационных характеристик объектов, включающих различные типы летательных аппаратов, осуществляется на открытом полигонном **эталонном радиолокационном измерительном комплексе**. Они нужны для получения данных, необходимых для проектирования и оценки эффективности радиолокационных средств Воздушно-космической обороны (ВКО). Эталонный радиолокационный измерительный комплекс – это наиболее крупномасштабная измерительная установка. Комплекс занимает площадь в несколько гектаров, на которой размещены специальные радиолокационные станции, позволяющие измерять уровни отраженного электромагнитного поля от объектов наблюдения в любых диапазонах длин волн, используемых в отечественной радиолокации. Для имитации реальных условий наблюдения исследуемый объект (ракета, беспилотный летательный аппарат) подвешивается между металлическими опорами на высоту до 30 м с помощью тросов. Поскольку вес и габариты объектов исследования ограничены, широко применяются методы теории подобия и масштабного физического моделирования в электродинамике.

Другим крупным комплексом ЦНИИ ВКС Минобороны России является **стрельбовый моделирующий комплекс**, предназначенный для исследования характеристик уязвимости летательных аппаратов к поражающему действию осколочно-фугасных боеприпасов при проектировании и оценке эффективности огневых средств. Здесь в условиях, близких к реальным, осуществляется стрельба осколочными элементами по установленным на земле самолетам, ракетам или их жизненно важным агрегатам. Для имитации условий боевого применения создается вакуум и выполняется нагрев мишеней.

В тех областях исследования, в которых экспериментальные работы ограничены или требуется изучение перспективных объектов, существующих только в проекте, в ЦНИИ ВКС широко развивается **математическое моделирование** (рис. 1), в том числе с применением супер-ЭВМ.

К таким исследованиям относятся, например, получение данных о применении перспективной сверхширокополосной радиолокации и определении радиолокационных портретов объектов, как показано на рис. 1. По существу, речь идет о развитии совершенно нового направления исследований – радиовидения, когда радиолокатор приобретает свойства, аналогичные оптико-электронному прибору сверхдальнего наблюдения и высокоточного распознавания.

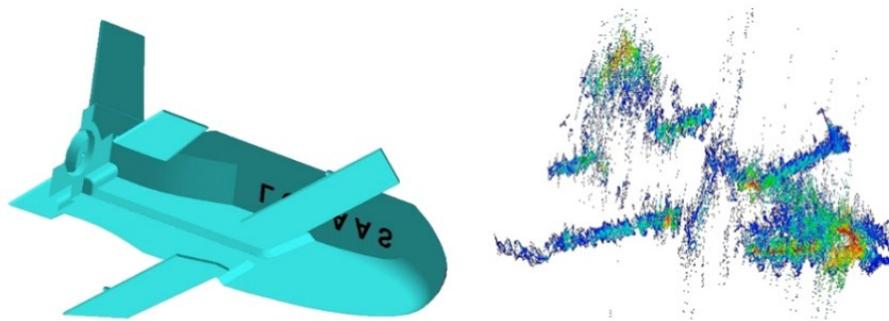


Рис. 1. Математическое моделирование специализированных характеристик летательных аппаратов

Другим перспективным направлением исследований с применением математических моделей является исследование влияния плазмы, сопутствующей гиперзвуковому входу и полету летательных аппаратов в атмосфере Земли. Совместно с учеными ЦАГИ и ЦНИИМаш изучаются состав и структура плазменных образований, влияние плазмы на динамические радиолокационные и оптические характеристики летательных аппаратов для проектирования и оценки эффективности средств обнаружения, распознавания и наведения на баллистические ракеты и перспективные гиперзвуковые летательные аппараты, а также исследуется влияние ионосферной плазмы на эффективность средств загоризонтной радиолокации.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении исследований в рамках рассматриваемой темы и поставленной цели получены:

структурированные направления, характеризующие возможности ЦНИИ ВКС по организации системных научных исследований для молодых ученых и специалистов, выпускников высших учебных заведений;

конкретные результаты совместных разработок ЦНИИ ВКС и ТвГТУ;

обоснованные требования к выпускникам высших учебных заведений, необходимые для научной работы.

По результатам обобщения и анализа приведенных в материалах статьи данных определены главные направления работ, проводимых в ЦНИИ ВКС, специальные возможности ЦНИИ ВКС по подготовке научных кадров, организации системных научных исследований для молодых ученых и специалистов, выпускников высших учебных заведений (рис. 2).



Рис. 2. Возможности ЦНИИ ВКС Минобороны России по организации системных научных исследований для молодых ученых и специалистов, выпускников высших учебных заведений

Следует отметить, что многие из представленных выше возможностей активно реализуются в образовательных учреждениях Твери, включая работу по профессиональной ориентации в физико-математической школе № 17 и Тверском суворовском военном училище. Наибольшие результаты достигнуты в настоящее время в сотрудничестве с ТвГТУ и сосредоточены на следующих направлениях:

1. Экспериментально-теоретические исследования в рамках государственного оборонного заказа.
2. Подготовка инженерных кадров по специальностям, востребованным для решения проблем ВКО в рамках созданной базовой кафедры ТвГТУ.
3. Подготовка научных кадров высшей квалификации как по тематике диссертационных советов ЦНИИ ВКС, так и советов ТвГТУ.
4. Реализация новых эффективных форм совместных научных исследований.

В решении научных задач участвуют студенты, аспиранты и преподаватели ТвГТУ. Осуществлена разработка цифровых 3D-моделей летательных аппаратов, их бортовых оптико-электронных систем и бортового вооружения, а также математическое моделирование нагрева и теплового излучения с помощью программного комплекса FlowVision. Масштабные оптические модели разработаны, изготовлены и используются для исследований на оптическом измерительном испытательном комплексе «Фотон». Получены расчетное распределение температуры по поверхности летательных аппаратов и прогнозируемая сигнатура инфракрасного излучения. Проведена верификация расчетных результатов по экспериментальным данным на лабораторно-экспериментальной базе ЦНИИ ВКС.

Следующий крупный научный результат, достигнутый совместно учеными ЦНИИ ВКС и ТвГТУ, связанный с проведением исследований на тему «Теория и адаптивные алгоритмы обнаружения антропогенных частиц и объектов и оценка их динамического взаимодействия с космическими аппаратами на основе интеллектуального анализа данных», был одобрен в Российской академии наук и рекомендован предприятиям Роскосмоса для создания средств защиты космических аппаратов от антропогенных частиц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научно-технический прогресс, быстрое внедрение достижений науки во все сферы жизни и производства требуют от молодого специалиста как широкого теоретического кругозора, так и творческого подхода к решению различного рода задач. Для работы в научно-исследовательском учреждении приобретает практическую значимость сформированный на основе опыта работ в ЦНИИ ВКС комплекс требований, предъявляемых к выпускникам высших учебных заведений и молодым специалистам. Он включает в себя:

владение не только необходимой суммой базовых и специальных знаний, но и навыками творческого решения практических задач;

постоянное повышение специалистами своей квалификации. Умение быстро адаптироваться к изменяющимся условиям для наиболее полного проявления индивидуальности, творческих способностей, готовности личности к самореализации;

умение целенаправленно искать информацию, перерабатывать имеющиеся данные;

знание закономерностей оптимального использования информации и умение прогнозировать результаты деятельности, используя свой интеллектуальный и творческий потенциал;

умение адекватно воспринимать возникающие проблемы в профессиональной области, правильно их оценивать, быстро адаптироваться к новым познавательным ситуациям.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Миронов В.А., Майкова Э.Ю. Социальные аспекты активизации научно-исследовательской деятельности студентов вузов: монография. Тверь: ТвГТУ, 2004. 100 с.

2. Власов В.А., Зольникова Л.М., Мойзес Б.Б., Степанов А.А. Организация и развитие молодежной науки в политехническом университете: монография. Томск: ТПУ, 2009. 221 с.

3. Фомичев В.В., Юловская В.Д. Наука как основа подготовки высококвалифицированных специалистов // *Высшее образование в России*. 2010. № 6. С. 48–55.

4. Цурков М.Л., Лопин Г.А. Научная школа академика Е.В. Золотова в ЦНИИ ВКС Минобороны России: этапы создания, достижения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 88–97.

**Для цитирования:** Байбаков А.И., Кочетыгов М.Ю. Возможности ЦНИИ ВКС Минобороны России по организации научных исследований для молодых ученых и специалистов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 93–102.

# **CAPABILITIES OF THE CENTRAL RESEARCH INSTITUTE OF THE RUSSIAN MINISTRY OF DEFENSE ON THE ORGANIZATION OF SCIENTIFIC RESEARCH FOR YOUNG SCIENTISTS AND SPECIALISTS**

A.I. BAIBAKOV, Cand. Sc., M.Yu. KOCHETYGOV

Central Research Institute of the Aerospace Forces of the Ministry of Defense of Russia  
32, Af. Nikitina emb., Tver, 170026, e-mail: nicpvotver@mail.ru

Based on the approach implemented in the classification analysis method, the directions and topics of research carried out in the lead research organization on the problems of building air (aerospace) defense of the country – the Central Research Institute of the Aerospace Forces of the Ministry of Defense of the Russian Federation (TsNII VKS) are structured in the interests of attracting talented young scientists and specialists - graduates of higher educational institutions - to research. Fundamental disciplines studied in educational institutions and of interest for solving problems of defense and security of the state are considered. The results of speeches of the heads of TsNII VKS at the 6th scientific seminar "Zolotovskiy Readings" are presented. Data on the existing scientific and technical potential of TsNII VKS and the prospects for its development are summarized to form target motivation in future young scientists.

*Keywords:* aerospace defense, mathematical modeling, young scientists and specialists, means of aerospace attack, scientific research, research structure, measuring complexes, characteristics of objects, plasma formations.

Поступила в редакцию/received: 16.11.2024; после рецензирования/revised: 20.11.2024;  
принята/accepted: 12.12.2024

УДК 004.932.2

## **ОСОБЕННОСТИ РЕГЕНЕРАЦИИ КОЖНЫХ РАН РАЗЛИЧНОЙ ЭТИОЛОГИИ**

В.Г. ШЕСТАКОВА, д-р мед. наук, А.О. БУГЛАК, ст. препод.,  
Ю.В. КОЗЛОВСКАЯ, канд. биол. наук, Р.Д. ПАВЛОВ, студ.

Тверской государственный медицинский университет,  
170100, Тверь, ул. Советская, 4, e-mail: snejo4ik@gmail.com

© Шестакова В.Г., Буглак А.О., Козловская Ю.В., Павлов Р.Д., 2025

На современном этапе развития медицины происходит активное внедрение естественных наук физико-математического цикла в сферу диагностики, лечения и профилактики заболеваний. Одним из перспективных направлений является использование кристалломорфологического метода диагностики, основанного на том, что реальные кристаллы обладают уникальными особенностями, которые определяют их габитус. Методы компьютерной морфометрии открывают широкие возможности для применения их в медицинской биокристаллологии, но для их практического

использования необходима значительная доработка и объединение усилий экспертов из

*Вестник Тверского государственного технического университета.  
Серия «Технические науки». № 1 (25), 2025*

разных областей. Рассмотрены гистологические характеристики препаратов кожи, а также процесс кристаллизации плазмы крови на различных этапах регенерации ран, вызванных различными причинами. Проанализированы литературные источники в области использования компьютерных технологий по рассматриваемому вопросу.

*Ключевые слова:* регенерация, раны кожи, кристалломорфология, биокристалломика, плазма крови, морфометрия, обработка изображений.

**DOI: 10.46573/2658-5030-2025-1-102-107**

## **ВВЕДЕНИЕ**

Повреждение кожных покровов и расположенных под ними тканей – распространенное явление. Поэтому важно разработать новые методы определения стадии восстановления, чтобы врачи могли выбрать оптимальную стратегию лечения. При исследовании особенностей кристаллизации биологических жидкостей человеческого организма было установлено, что они могут служить надежными индикаторами его функционального состояния в определенных физиологических и патологических условиях [1–3].

В научных трудах рассматриваются вопросы использования технологий, позволяющих считывать и распознавать характеристики высушенных образцов биологических жидкостей с помощью компьютера [4–6].

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

В исследовании участвовали беспородные белые крысы-самцы в возрасте 8–9 месяцев. Животные содержались в стандартных условиях вивария, получали достаточное количество пищи и воды. Перед началом эксперимента они прошли карантин, чтобы исключить вероятность попадания посторонних микроорганизмов. Все процедуры проводились в соответствии с правилами и нормами работы с экспериментальными животными.

Крысы были разделены на три группы. Первой группе животных на предварительно подготовленную поверхность спины наносили раны площадью 225 мм<sup>2</sup>, затрагивающие кожу и подкожно-жировую клетчатку [3].

Второй группе крыс с помощью специального паяльника наносили ожоги общей площадью 225 мм<sup>2</sup>, что составляло около 14 % площади кожи [3, 8].

У крыс из третьей группы после повреждения кожи и подкожно-жировой клетчатки поверхность раны инфицировали золотистым стафилококком (*Staphylococcus aureus*) в концентрации  $1,5 \times 10^8$  клеток/мл по McFarland. В качестве анестезии использовался препарат «Золетил-100» в дозировке 8 мг/кг.

На 7, 14 и 21-й день измеряли размеры ран и струпа. В те же сроки брали образцы тканей из заживающих ран и прилегающих участков неповрежденной кожи. Образцы фиксировали в 10%-м растворе нейтрального забуференного формалина (рН 7,4) на 24 ч, затем заливали в парафин и делали срезы толщиной 5–6 мкм. Срезы окрашивали растворами гематоксилина и эозина и анализировали морфологическую картину.

В эти же сроки брали также кровь для анализа. К 2 мл плазмы крови, полученной путем центрифугирования, добавляли 10 мл 2%-го спиртового раствора нингидрина. Полученную смесь разливали по чашкам Петри и оставляли на 12...14 ч для кристаллизации [7].

Путем анализа литературных источников были выявлены сильные и слабые стороны использования компьютерных технологий для исследования результатов кристаллизации биологических материалов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Заживление ран – это естественный процесс, выработанный в ходе эволюции. Он включает несколько этапов, среди которых особо выделяют следующие:

гемостаз, т.е. остановку кровотечения;  
воспаление – реакцию иммунной системы на повреждение тканей;  
пролиферацию клеток – образование новых клеток для восстановления поврежденных участков;

ремоделирование внеклеточного матрикса – изменение структуры новых тканей.

Изучение процессов заживления ран и восстановления кожи после различных повреждений включает в себя оценку их эстетического вида. Для достижения желаемого результата необходимо:

1) правильно определить стадию заживления, чтобы лечение соответствовало текущему этапу;

2) минимизировать нарушение зоны заживления во время лечебно-диагностических процедур.

В связи с этим было решено использовать метод тизиографии для определения стадии заживления без прямого контакта с раной. Данный метод позволяет изучить кинетику роста и визуальные характеристики кристаллов, а также сравнить эффективность кристалломорфологического метода и традиционных способов диагностики.

Процесс кристаллизации происходит в два этапа:

1) возникновение субмикроскопического «зародыша» кристаллической фазы, способного к дальнейшему росту;

2) дальнейший рост этого «зародыша».

Известно, что процесс образования кристаллов чувствителен к присутствию примесей [1].

Стереометрическая обработка полученных результатов заключалась в подсчете плотности центров кристаллизации – среднего арифметического числа пересечений лучей кристаллов на 1 см<sup>2</sup>. На измеряемой поверхности в двух взаимно перпендикулярных направлениях просматривали девять полей зрения и подсчитывали количество центров кристаллизации в пределах каждого поля [8, 9].

При кристаллизации чистого спиртового раствора нингидрина формируются крупные кристаллы в форме правильных сферолитов с 35...40 лучами, исходящими из центра кристаллизации. Однако при добавлении плазмы крови интактных крыс и крыс из опытных групп форма кристаллов меняется.

На 7-е сутки исследования кристаллы принимают форму полусферолитов с 15...20 лучами различной длины. На 14-е сутки формируются кристаллы, напоминающие полусферолиты, с количеством лучей от 20 до 25. На 21-е сутки эксперимента кристаллы становятся сферолитами с 30...35 лучами [7].

В первой опытной группе, где была нанесена полнослойная хирургическая рана, на 7, 14 и 21-е сутки исследования было зафиксировано четкое изменение кристалломорфологического рисунка, выражающееся в трансформации полусферолитов в сферолиты (рис. 1).

Кристаллы, образовавшиеся в процессе кристаллизации плазмы второй опытной группы крыс с ожоговой раной, характеризовались крупными размерами и ярко

выраженными лучами. Это можно объяснить тем, что ожоговые раны сопровождаются повышением уровня перекисного окисления липидов в плазме крови, что компенсируется увеличением общей антиоксидантной активности. Данный процесс, вероятно, сопровождался значительными изменениями в метаболизме углеводов и подавлением некоторых ферментативных реакций (рис. 2).

При кристаллизации плазмы крыс из третьей опытной группы с инфицированной раной было отмечено увеличение количества кристаллов в поле зрения по сравнению с группами 1 и 2. Сами кристаллы были более мелкими. Увеличение числа кристаллов можно объяснить присутствием большого количества микроорганизмов в ране, которые также могут выступать в роли центров кристаллизации (рис. 3).

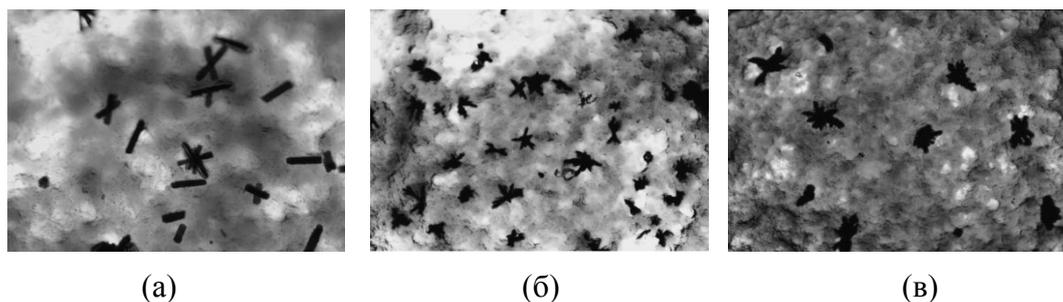


Рис. 1. Спиртовой раствор нингидрина с плазмой крыс опытной группы 1 на 7-е (а), 14-е (б) и 21-е (в) сутки исследования.  
Увеличение  $\times 200$  (а),  $\times 100$  (б, в)

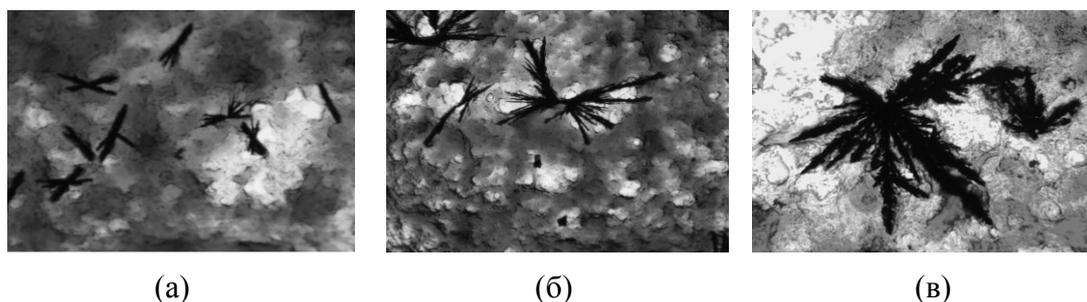


Рис. 2. Спиртовой раствор нингидрина с плазмой крыс опытной группы 2 на 7-е (а), 14-е (б) и 21-е (в) сутки исследования.  
Увеличение  $\times 100$  (а, б),  $\times 400$  (в)

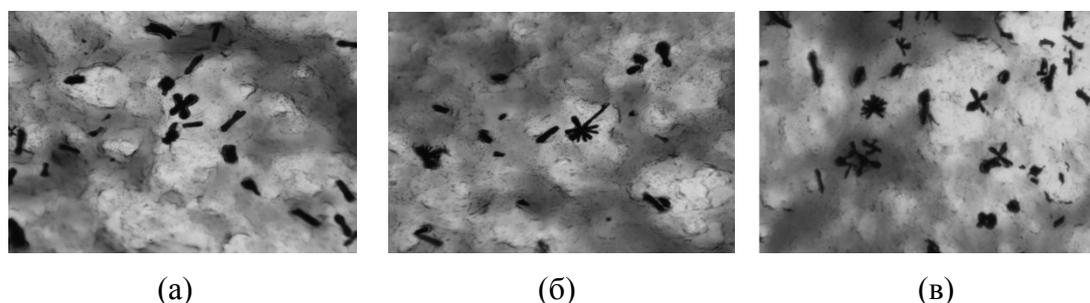


Рис. 3. Спиртовой раствор нингидрина с плазмой крыс опытной группы 3 на 7-е (а), 14-е (б) и 21-е (в) сутки исследования.  
Увеличение  $\times 100$

В ряде российских научных организаций, расположенных в Москве, Волгограде и Сарове, были разработаны и успешно апробированы системы, предназначенные для фотографирования и/или видеосъемки кристаллических структур с применением микроскопов. Использованный В.В. Шабалиным метод морфологического анализа заключался в поиске специфических «ключевых» структур в микроскопическом образце [6], а затем их количественной оценке по плотности элементов в поле зрения. Разработанные в лаборатории М.Э. Бузовера программные продукты «ProtoBlood» и «ProtoSaliva» предназначались для анализа и описания характеристик текстуры кристаллов. В частности, они позволяли определить наличие, глубину и площадь объектов, а также изучить оптические свойства образца [5]. Преимущества компьютерной обработки результатов биокристаллоскопии связаны с исключением субъективного фактора при анализе, а также с ускорением и автоматизацией тезиокристаллоскопического теста.

К объективным факторам, ограничивающим широкое применение этих методов, относятся:

невозможность создания полноценного банка образцов, которые будут соответствовать заданной программе анализа изображений;

отсутствие единого общепринятого подхода, параметров и критериев для интерпретации результатов анализа кристаллизации биологического материала;

высокая стоимость компьютеризации исследований.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе проведения эксперимента в различных группах были выявлены изменения в количестве, конфигурации и размере кристаллов, характерные для каждой стадии. Эти параметры представляют диагностическую ценность и позволяют рассматривать биокристалломику как один из дополнительных и малотравматичных методов исследования процесса регенерации. В строении кристаллов было выявлено более пятидесяти различных структур, которые можно изучать с помощью специальных компьютерных программ. Каждая из этих структур имеет свои уникальные характеристики, такие как ориентация, размер, форма и морфология, а также признаки разрушения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Курбатова Л.А. Кристаллизация в биологических средах и ее применение в медицине: дис. ... канд. хим. наук. Тверь, 1995. 160 с.
2. Мартусевич А.К., Ковалева Л.К., Самоделкин А.Г. Современные методы биокристалломики в оценке состояния организма животного // *Вестник Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии*. 2019. № 2 (22). С. 54–57.
3. Буглак А.О., Шестакова В.Г., Ганина Е.Б. Биокристалломика как метод прогнозирования течения репарации ожоговых ран кожи // *Молодежный инновационный вестник*. 2023. Т. 12. № 1. С. 24–25.
4. Мартусевич А.К. Биокристалломика как наука о спонтанном, направленном и управляемом биокристаллогенезе // *Информатика и системы управления*. 2008. № 2. С. 145–148.
5. Бузоверя М.Э., Шишпор И.В., Шатохина С.Н., Кац Ю.Д., Шабалин В.Н. Морфометрический анализ фаций сыворотки крови // *Клиническая лабораторная диагностика*. 2003. № 9. С. 22–23.

6. Шабалин В.В. Принципы обработки изображений структур биологических жидкостей // *Материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Функциональная морфология биологических жидкостей»*. М.: [Б. и.], 2004. С. 45–46.

7. Буглак А.О., Шестакова В.Г., Ганина Е.Б., Захарова В.Н., Патрошкина В.В. Тезиснографический метод исследования плазмы крови // *Тверской медицинский журнал*. 2023. № 5. С. 67–71.

8. Боечко И.Д., Зенин Б.А. Кристалломорфологический метод исследований // *Сборник докладов III научной конференции физиологов, биохимиков и фармакологов Западно-Сибирского объединения*. Томск: Томский университет, 1965. С. 24–26.

9. Козлова О.Г. Рост и морфология кристаллов. М.: МГУ, 1980. 357 с.

**Для цитирования:** Шестакова В.Г., Буглак А.О., Козловская Ю.В., Павлов Р.Д. Особенности регенерации кожных ран различной этиологии // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 102–107.

## FEATURES OF REGENERATION OF SKIN WOUNDS OF VARIOUS ETIOLOGIES

V.G. SHESTAKOVA, Dr. Sc., A.O. BUGLAK, Senior Lecturer,  
Yu.V. KOZLOVSKAYA, Cand. Sc., R.D. PAVLOV, Student

Tver State Medical University,  
4, Sovetskaya str., Tver, 170100, e-mail: snejo4ik@gmail.com

At the present stage of medicine development, there is an active introduction of natural sciences of the physical and mathematical cycle into the field of diagnostics, treatment and prevention of diseases. One of the promising areas is the use of the crystallomorphological method of diagnostics, based on the fact that real crystals have unique features that determine their habitus. Computer morphometry methods open up wide opportunities for their application in medical biocrystallography, but their practical use requires significant revision and unification of efforts of experts from different fields. The histological characteristics of skin preparations, as well as the process of crystallization of blood plasma at various stages of wound regeneration caused by various reasons are considered. Literary sources in the field of using computer technologies on the issue under consideration are analyzed.

*Keywords:* regeneration, skin wounds, crystallomorphology, biocrystallography, blood plasma, morphometry, image processing.

Поступила в редакцию/received: 16.11.2024; после рецензирования/revised: 20.11.2024;  
принята/accepted: 12.12.2024

**ВЕСТНИК  
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Технические науки»**

**Научный рецензируемый журнал  
№ 1 (25), 2025**

**Online ISSN 2687-0029**

Редактор М.Б. Юдина  
Корректор С.В. Зорикова

---

Дата выхода в свет 21.02.2025

---

Редакционно-издательский центр  
Тверского государственного технического университета  
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22