

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
№ 3 (31), 2026

Online ISSN 2687-0029

Тверь 2026

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

Дзюба С.М., д.ф.-м.н., профессор ТвГТУ

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

Члены редакционной коллегии:

По направлению «Машиностроение»

Албагачиев А.Ю., д.т.н., профессор ИМАШ РАН

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

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

Козырева Л.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

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

Сдобняков Н.Ю., д.ф.-м.н., доцент ТвГУ

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

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

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 единый государственный перечень научных изданий «Белый список», 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.

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> Об энергетических затратах при лазерной резке образцов быстрорежущей стали.....	5
<i>Головнин А.А.</i> Синтез и кинематический анализ кривошипно-коромыслового механизма привода велосипеда.....	11
<i>Архаров А.П.</i> Усовершенствование способа и патрона для установки вала со шпоночным пазом на центрах станка	20
<i>Сахаров К.А.</i> Распределение элементного состава в быстрорежущей стали после лазерного упрочнения.....	26
<i>Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В.</i> Взаимосвязь энергетических параметров лазерного плавления и характеристик микроструктуры никелевого сплава.....	32

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

<i>Горлов И.В., Гулийев И.М.о.</i> Анализ механических и конструктивных параметров барабанного фрезера МТФ-14 с точки зрения использования гидравлического привода при капитальном ремонте.....	41
<i>Яблонев А.Л., Андрианова А.А.</i> Методика расчета параметров проточного канала для инкубационной системы, устанавливаемой на отработанных торфяных месторождениях	48
<i>Купорова А.В.</i> Оценка водно-физических свойств кускового торфа с применением гидрофобизации торфомассы перед формованием	57
<i>Кочканян С.М., Кондратьев А.В.</i> Определение толщины диска валкового сортирующе-сепарирующего устройства.....	65
<i>Болотов А.Н., Яблонев А.Л.</i> Магнитные смазочные жидкости в горном деле: физико-химические основы, трибологические характеристики и перспективы применения.....	73
<i>Щербакова Д.М., Лобачева Л.В.</i> Исследование истечения загрязненного потока при устранении засора в трубах-мостах при добыче торфяного сырья.....	85

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

<i>Белова О.Д., Матвеев Ю.Н.</i> Алгоритм приближенного решения задачи оптимального управления на бесконечном горизонте.....	91
<i>Лукьянов Р.А., Карельская К.А.</i> Применение регрессионных моделей для частичной автоматизации оценки трудозатрат в ИТ-проектах	96
<i>Иванов А.В., Матвеев Ю.Н.</i> Планирование и оптимизация линейного раскроя металлопроката методами целочисленного программирования.....	102
<i>Фомина Е.Е.</i> Автоматизированная система поддержки принятия решений в задачах идентификации личности по визуальным данным.....	111
<i>Горобченко С.Л., Соколова В.А., Вернер Н.Н., Войнаш С.А., Алексеева С.В.</i> Решение задачи прогнозирования для последовательностей со сверхбольшим количеством временных рядов.....	121

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V.</i> On energy consumptions in laser cutting of high-speed steel samples.....	5
<i>Golovnin A.A.</i> Synthesis and kinematic analysis of the swing-rocker mechanism of a bicycle drive.....	11
<i>Arkharov A.P.</i> The method and the chuck for mounting a keyway shaft on machine centers improvement	20
<i>Sakharov K.A.</i> Distribution of elemental composition in high-speed steel after laser hardening.....	26
<i>Izmailov V.V., Afanasieva L.E., Novoselova M.V.</i> Relationship between energy parameters of laser melting and microstructure characteristics of a nickel alloy.....	32

SUBSOIL USE AND MINING SCIENCES

<i>Gorlov I.V., Gulijev I.M.o.</i> Analysis of mechanical and design parameters of the MTF-14 drum milling-cutter from the point of view of the use of a hydraulic drive during major repairs.....	41
<i>Yablonev A.L., Andrianova A.A.</i> A method for calculating flow-channel parameters for an incubator system installed at depleted peat deposits.....	48
<i>Kuporova A.V.</i> Assessment of water-physical properties of lump peat with application of peat mass hydrophobization before forming.....	57
<i>Kochkanyan S.M., Kondratyev A.V.</i> Determining the thickness of a disk of a rolling sorting and separating device.....	65
<i>Bolotov A.N., Yablonev A.L.</i> Magnetic lubricants in mining: physical and chemical principles, tribological characteristics and application prospects.....	73
<i>Shcherbakova D.M., Lobacheva L.V.</i> Study of contaminated flow discharge during clearing blockages in pipe-bridges used in peat raw material extraction.....	85

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

<i>Belova O.D., Matveev Yu.N.</i> Algorithm for the approximate solution of optimal control on an infinite horizon.....	91
<i>Lukyanov R.A., Karelskaya K.A.</i> Application of regression models for partial automation of workload estimation in IT projects.....	96
<i>Ivanov A.V., Matveev Yu.N.</i> Planning and optimization of linear cutting of metal products using integer programming methods.....	102
<i>Fomina E.E.</i> Automated decision support system for personality identification tasks using visual data.....	111
<i>Gorobchenko S.L., Sokolova V.A., Werner N.N., Voinash S.A., Alekseeva S.V.</i> Solving the forecasting problem for sequences with an ultra-large number of time series.....	121

ОБ ЭНЕГЕТИЧЕСКИХ ЗАТРАТАХ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ ОБРАЗЦОВ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2026

Проведена оценка применимости уравнения баланса мощностей при лазерной резке быстрорежущей стали со вспомогательным газом азотом для повышения эффективности процесса. Приведено сравнение величин энергетических параметров, полученных экспериментально и путем теоретического расчета. Установлено, что разрезание материала обеспечивается при значении энергии не менее 18 Дж/мм^3 на единицу объема расплава. При этом шероховатость поверхности реза исследованных образцов соответствовала значениям параметра $Ra = 1,3 \dots 6,8 \text{ мкм}$.

Ключевые слова: лазерная резка, быстрорежущая сталь, энергетический баланс.

ВВЕДЕНИЕ

Лазерная резка в настоящее время широко применяется в промышленности и имеет ряд преимуществ как перед традиционными механическими, так и перед другими термическими технологиями разделения материалов – газовой и плазменной резкой благодаря сочетанию высокой производительности с высокой точностью и качеством реза. Для повышения эффективности процессов лазерной резки при обеспечении высокого качества необходим анализ их энергетического баланса. Этому вопросу уделяется большое внимание [1–7].

Целью настоящей работы является анализ энергетических затрат при лазерной резке быстрорежущей стали со вспомогательным газом азотом для повышения эффективности процесса.

ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования энергетических затрат при лазерной резке проводились на заготовках быстрорежущей стали марки Р6М5 (ГОСТ 19265-73) размером $120 \times 40 \times h \text{ мм}$ (где h – толщина образца), упрочненных с помощью объемной закалки и трехкратного отпуска при температуре $560 \text{ }^\circ\text{C}$ [8]. Лазерная резка заготовок выполнялась на лазерном комплексе BySprint 3015 компании Bystronic с использованием вспомогательного газа азота на диапазонах технологических параметров резки:

толщина образцов, мм	3,3...9,5;
мощность лазерного излучения, кВт	1,8...4,4;
скорость резки, м/мин	0,2...3,0;
давление вспомогательного газа, МПа	0,8...1,4.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых параметров, характеризующих процесс лазерной резки и влияющих на качество реза, является энергетический параметр q_V – энергия лазерного излучения, вложенная в единицу объема удаляемого из канала реза материала:

$$q_V = \frac{A \cdot W}{h \cdot v \cdot d},$$

где A – коэффициент поглощения лазерного излучения в канале реза [3, 5]; W – мощность лазерного излучения; v – скорость резки; d – ширина реза. Произведение $A \cdot W$, как это принято, будем называть эффективной мощностью $W_{\text{эфф}}$.

Энергетический параметр q_V – комплексная величина, зависящая не только от мощности лазерного излучения, но и от условий его фокусирования. Глубина прорезания и ширина реза зависят от положения фокуса относительно поверхности материала, которое задает размер лазерного пятна на поверхности.

Важнейшим критерием качества лазерной резки является шероховатость поверхности реза [9–11]. Для количественной оценки шероховатости поверхности реза мы рекомендуем использовать параметр Ra – арифметическое среднее отклонение профиля шероховатости (ГОСТ Р ИСО 4287-2014). Это статистически стабильный параметр, определяемый практически всеми приборами для контроля качества поверхности.

При лазерной резке происходит локальное плавление материала и удаление расплава струей вспомогательного газа. Уравнение баланса мощностей при лазерной резке с инертным газом можно записать в виде

$$A \cdot W = W_{\text{пл}} + W_{\text{нагр}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{пл}}$ – мощность, затрачиваемая на нагрев и плавление материала в зоне реза; $W_{\text{нагр}}$ – мощность, расходуемая на нагрев материала вне зоны реза вследствие теплопроводности. В уравнении (1) не учтены незначительные потери мощности за счет конвективного охлаждения образца как вспомогательным газом, так и окружающим воздухом [1, 3, 5].

Величина $W_{\text{пл}}$ может быть рассчитана на основании очевидного уравнения расчета энергетических затрат на нагрев и плавление разделяемого материала в объеме канала плавления:

$$W_{\text{пл}} = v \cdot d \cdot h \cdot \rho \cdot (c \cdot \Delta T + L), \quad (2)$$

где ρ – плотность материала; c и L – удельная теплоемкость и удельная теплота плавления материала; ΔT – изменение температуры образца от начальной до температуры жидкого металла в зоне реза (плавления).

Мощность, расходуемую на нагрев материала вне зоны реза вследствие теплопроводности, можно рассчитать по уравнению

$$W_{\text{нагр}} = 2 \cdot v \cdot z_e \cdot h \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где z_e – эффективный размер нагретой зоны в глубь материала от боковой поверхности реза. Для оценки величин z_e и $W_{\text{нагр}}$ различные авторы используют теоретические модели распространения тепла от поверхности реза в глубь образца [1, 7, 12, 13].

В данной работе мощность, затраченную на нагрев материала вне зоны реза (тепловые потери), рассчитывали по формуле [1, 13]:

$$W_{\text{нагр}} = 2 \cdot v \cdot h \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T \sqrt{\frac{2 \cdot \chi}{v} \left(d + \frac{\chi}{v} \right)}. \quad (4)$$

При применении формул (2)–(4) следует учитывать, что входящие в них физические константы материала так или иначе зависят от температуры, иногда довольно значительно, как, например, теплоемкость стали. Обычно в расчетах используются средние величины физических констант в диапазоне температур от комнатной до температуры плавления, что объективно делает эти расчеты приблизительными.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость относительной величины $\frac{W_{\text{эфф}} - W_{\text{нагр}}}{W_{\text{пл}}}$ от энергетического параметра q_V представлена на рис. 1. Безразмерная величина $\frac{W_{\text{эфф}} - W_{\text{нагр}}}{W_{\text{пл}}}$ характеризует эффективность режима лазерной резки и равна отношению доли эффективной мощности, которая фактически могла быть затрачена на плавление материала, к теоретическому значению мощности, необходимой для плавления. Ряд точек на графике рис. 1 соответствует значению параметра эффективности меньше единицы. Это означает, что энергии лазерного излучения может оказаться недостаточно для расплавления материала соответствующих образцов по всей их толщине. Действительно, часть таких образцов оказались неразрезанными, остальные имели грубую поверхность реза с глубокими рисками с шагом 2...3 мм и глубиной более 0,5 мм при максимальной высоте шероховатости менее 50 мкм.

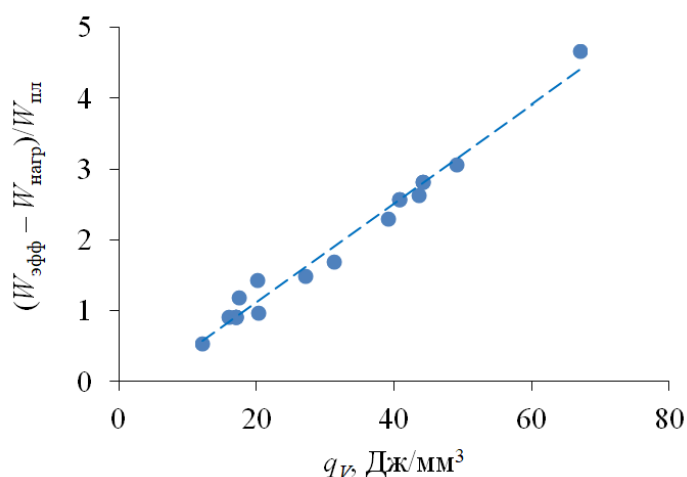


Рис. 1. Параметр эффективности процесса лазерной резки $\frac{W_{\text{эфф}} - W_{\text{нагр}}}{W_{\text{пл}}}$ в зависимости от удельной энергии лазерного излучения q_V : точки – экспериментальные данные; пунктирная линия – аппроксимация

Из рис. 1 следует, что условие $\frac{W_{\text{эфф}} - W_{\text{нагр}}}{W_{\text{пл}}} > 1$ соответствует удельной энергии лазерного излучения $q_V \gtrsim 18 \text{ Дж/мм}^3$, что следует рассматривать как условие успешной операции разделения данного материала лазерной резкой.

На рис. 2 представлена зависимость параметра $\frac{W_{\text{пл}} + W_{\text{нагр}}}{h}$ от произведения $v \cdot d$. Если считать, что основные потери энергии связаны с нагревом объема материала вне зоны реза, то $W_{\text{пл}} + W_{\text{нагр}} = A \cdot W$ (см. уравнение (1)). Зависимость $(A \cdot W) = f(v \cdot d)$, построенная по полученным нами экспериментальным данным, хорошо аппроксимируется линейной функцией с коэффициентом корреляции $R = 0,86$ (рис. 2). Теоретическая зависимость параметра $\frac{W_{\text{пл}} + W_{\text{нагр}}}{h}$ от произведения $v \cdot d$ также представлена на рис. 2 как результат расчетов по уравнениям (2) и (4). Из уравнения (2) очевидно, что зависимость $(W_{\text{пл}} / h) = f(v \cdot d)$ линейная, тогда как согласно уравнению (4) зависимость $(W_{\text{нагр}} / h) = f(v \cdot d)$ – нелинейная, однако результирующая зависимость $\frac{W_{\text{пл}} + W_{\text{нагр}}}{h} = f(v \cdot d)$ также имеет практически линейный характер.

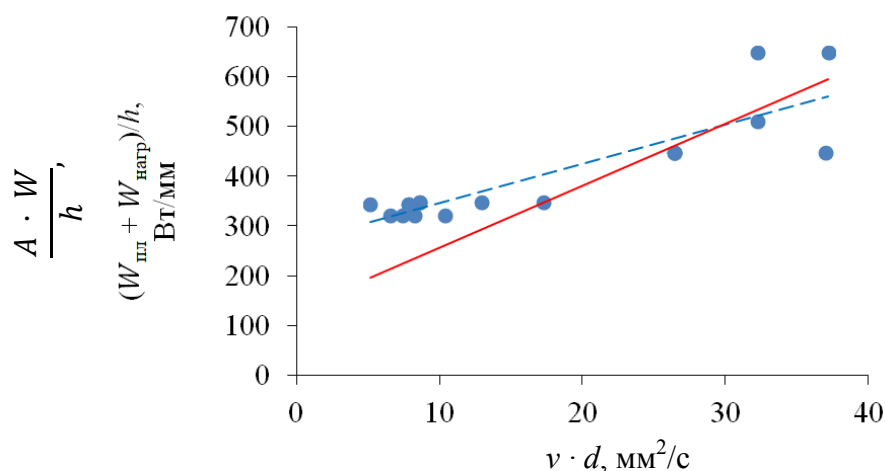


Рис. 2. Зависимости $\frac{A \cdot W}{h} = f(v \cdot d)$ и $\frac{W_{\text{пл}} + W_{\text{нагр}}}{h} = f(v \cdot d)$: точки – экспериментальные данные; пунктирная линия – аппроксимация экспериментальной зависимости; сплошная линия – результат расчета

Зависимость энергетического параметра q_V от параметров лазерной резки $v \cdot d$ представлена на рис. 3. Она носит убывающий характер, который объясняется тем, что согласно уравнению (4) энергия, затраченная на нагрев материала вне зоны реза (тепловые потери), убывает с ростом произведения $v \cdot d$. При этом энергия, затраченная на нагрев и плавление единичного объема материала в зоне реза, – постоянная величина для данного материала.

Из рис. 3 следует, что при $q_V \lesssim 17 \text{ Дж/мм}^3$ экспериментальная зависимость $q_V = f(v \cdot d)$ лежит ниже теоретической и при таких значениях объемной плотности энергии лазерного излучения материал не будет разделен. Действительно, точки на графике рис. 3, лежащие ниже теоретической кривой $q_V = f(v \cdot d)$, соответствуют образцам, которые не были разрезаны, что отмечено выше. Критические значения параметра q_V , определенные в соответствии с рис. 1 и 3, практически совпадают.

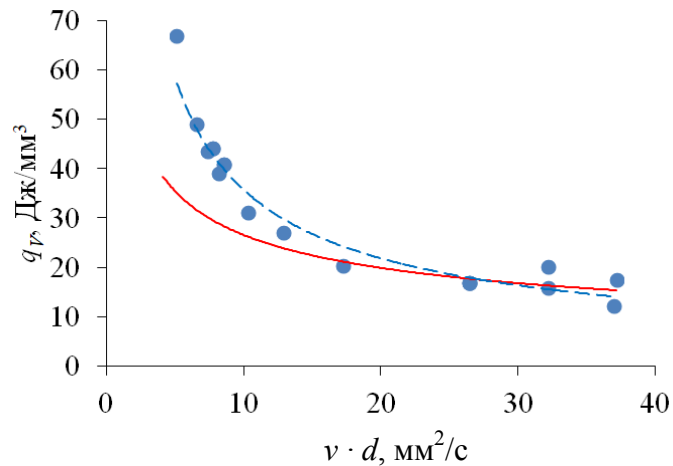


Рис. 3. Зависимость энергетического параметра q_v от произведения $v \cdot d$: точки – экспериментальные данные; пунктирная линия – аппроксимация; сплошная линия – теоретическая зависимость

Зависимость термического КПД процесса лазерной резки от параметра $v \cdot d$, построенная по результатам описанных экспериментов, приведена на рис. 4. Термический КПД определяли как отношение мощности, затраченной на нагрев и плавление материала в зоне реза $W_{пл}$, к эффективной мощности $W_{эфф}$: $\eta_T = W_{пл} / W_{эфф}$ [14].

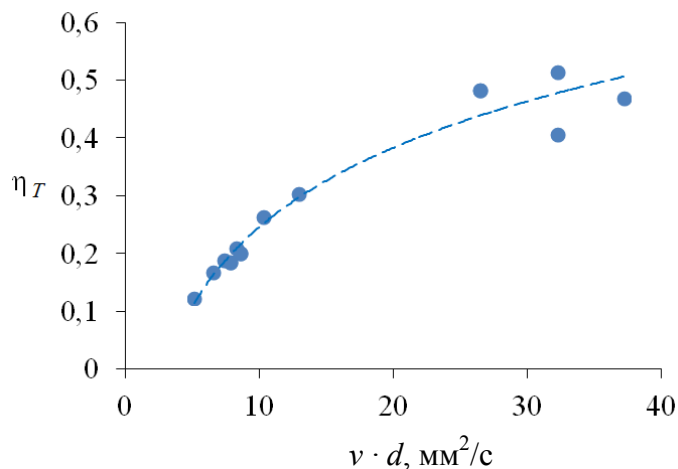


Рис. 4. Зависимость термического КПД процесса лазерной резки от параметра $v \cdot d$: точки – экспериментальные данные; пунктирная линия – аппроксимация

Увеличение термического КПД с ростом параметра $v \cdot d$ связано с отмеченным выше уменьшением потерь энергии на нагрев материала вне зоны лазерного реза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере образцов из быстрорежущей стали показана возможность использования уравнений энергетического баланса для оценки параметров лазерной резки. С помощью таких уравнений установлено, что требуемая для данного материала энергия лазерного излучения q_v , вложенная в единицу объема удаляемого из канала реза материала, должна составлять не менее 18 Дж/мм³. В противном случае разрезаемый материал может остаться неразделенным.

Оптимизация параметров лазерной резки по критерию шероховатости не входила в задачи данного исследования. Можно только отметить, что шероховатость поверхности реза исследованных образцов соответствовала значениям параметра $Ra = 1,3 \dots 6,8$ мкм, и это можно считать вполне качественным результатом [8, 10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Базылева И.О., Галушкин М.Г., Голубев В.С., Дубровина Е.А., Карасев В.А. Термические потери в процессе газолазерной резки металлов // *Современные лазерно-информационные и лазерные технологии: Сб. трудов ИПЛИТ РАН* / под ред. В.Я. Панченко и В.С. Голубева. М.: Интерконтакт Наука, 2005. С. 221–227.
2. Карасев В.А., Голубев В.С., Филиппова Е.О. Термический КПД и эффективный коэффициент поглощения энергии лазерного излучения при газолазерной резке низкоуглеродистой стали в струе азота и воздуха // *Физика и химия обработки материалов*. 2009. № 6. С. 72–77.
3. Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Энергетические условия газолазерной резки толстых стальных листов // *Прикладная механика и техническая физика*. 2011. Т. 52. № 3. С. 16–23.
4. Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Энергетические характеристики лазерно-кислородной резки стали излучением CO_2 -лазера // *Квантовая электроника*. 2012. Т. 42. № 7. С. 640–644.
5. Голышев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Высококачественная лазерная резка нержавеющей стали в атмосфере инертного газа с помощью волоконного иттербиевого и CO_2 -лазеров // *Квантовая электроника*. 2014. Т. 44. № 3. С. 233–238.
6. Голышев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Экспериментальное сравнение затрат лазерной энергии при качественной лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали излучениями волоконного и CO_2 -лазеров // *Квантовая электроника*. 2015. Т. 45. № 9. С. 873–878.
7. Фомин В.М., Голышев А.А., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Энергетика высококачественной резки стали волоконным и CO_2 -лазерами // *Прикладная механика и техническая физика*. 2017. Т. 58. № 2. С. 212–220.
8. Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Измайлов В.В., Барчуков Д.А. Исследование триботехнических свойств поверхностей, полученных воздействием концентрированных потоков энергии: монография. Тверь: ТвГТУ, 2022. 164 с.
9. Фомин В.М., Голышев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Механические характеристики высококачественной лазерной резки стали волоконным и CO_2 -лазерами // *Прикладная механика и техническая физика*. 2015. Т. 56. № 4. С. 215–225.
10. Голышев А.А. Стандартизация лазерно-кислородной резки по критерию шероховатости поверхности // *Обработка металлов*. 2016. № 1. С. 16–21.
11. Малий Д.В., Медведев П.Н. Влияние шероховатости и теплопроводности обрабатываемой стали на выбор параметров газолазерной резки // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 3. С. 52–61.
12. Галушкин М.Г., Голубев В.С., Гришаев Р.В. Сравнительный анализ аналитических методов оценки термических потерь для газолазерной резки // *Физика и химия обработки материалов*. 2012. № 1. С. 5–9.
13. Голубев В.С. Механизмы удаления расплава при лазерной резке материалов: монография // *Глубокое каналирование и филаментация мощного лазерного излучения в веществе* / под ред. В.Я. Панченко. М.: Интерконтакт Наука, 2009. С. 102–143.

14. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. Об энергетических затратах при лазерной резке образцов быстрорежущей стали // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 3 (31). С. 5–11.

ON ENERGY CONSUMPTIONS IN LASER CUTTING OF HIGH-SPEED STEEL SAMPLES

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

The applicability of a power balance equation for laser cutting of high-speed steel with nitrogen as an assisting gas to improve process efficiency was assessed. Energy parameters obtained experimentally and through theoretical calculations were compared. It was found that material cutting was achieved with an energy per unit melt volume more than 18 J/mm^3 . The cut surface roughness of the studied samples corresponded to $Ra = 1.3 \dots 6.8 \text{ }\mu\text{m}$.

Keywords: laser cutting, high-speed steel, energy balance.

Поступила в редакцию/received: 17.04.2026; после рецензирования/revised: 24.04.2026;
принята/accepted: 30.04.2026

УДК 621.833.6

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-11-20

СИНТЕЗ И КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КРИВОШИПНО-КОРОМЫСЛОВОГО МЕХАНИЗМА ПРИВОДА ВЕЛОСИПЕДА

А.А. ГОЛОВНИН, канд. техн. наук

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

© Головнин А.А., 2026

Статья посвящена синтезу и кинематическому анализу рычажного механизма привода вращения заднего колеса велосипеда, ведущим звеном которого является обычная для велосипеда каретка с полноповоротным движением кривошипов. Для синтеза и кинематического анализа выбран механизм с простейшей структурной схемой – четырехзвенный рычажный, а именно кривошипно-коромысловый механизм. Принят общий порядок проектирования рычажного механизма. Приведен выбор с обоснованием задач, которые должны быть решены в процессе синтеза и кинематического анализа. В качестве показателя эффективности работы механизма предложено использовать отношение угла прямого хода кривошипа к углу половины дуги окружности (180°). Для кинематического анализа применен графоаналитический

метод. Приведены планы скоростей и передаточные функции механизма для ряда характерных положений механизма на прямом ходе.

Ключевые слова: привод велосипеда, кривошипно-коромысловый механизм, синтез, кинематический анализ.

ВВЕДЕНИЕ

Недостатком известного велосипеда является наличие цепной передачи, чувствительной к неизбежному контакту с абразивными частицами окружающей среды. По статистике, средним ресурсом самых обычных цепей (Sram, Shimano) принято считать 1 000...1 500 км [1] – это 20...30 поездок на расстояние 25 км. Частично защитить велосипедную цепь от пыли, воды, камней, а также предотвратить попадание масла на одежду во время езды можно при помощи протектора велосипедной цепи. Возможна также замена цепной передачи на ременную, которая, впрочем, по габаритным параметрам уступает цепной.

Радикальное решение, позволяющее обойтись без цепной передачи, – велосипед с рычажным приводом, идея которого известна, по крайней мере, с 1986 года. В нем, например, педали могут быть закреплены на оси, расположенной рядом с осью заднего колеса, на качающихся рычагах, к которым крепятся две короткие незамкнутые цепи, взаимодействующие с двумя шестернями с храповиками, расположенными по обе стороны задней втулки.

[2]. Южнокорейский Bygen анонсировал разработку своего велосипеда с рычажным приводом в 2014 году. С 2023 года известно о прототипе шоссейного велосипеда NuBike изобретателя из Лос-Анджелеса Роджера Паркера. Педали в этом велосипеде закреплены на рычагах, совершающих неполный поворот вокруг оси, расположенной рядом с осью заднего колеса [3]. Недостатком велосипедов с таким приводом является то, что при езде на них ноги при надавливании на педаль смещаются назад, в то время как из эргономических соображений предпочтительнее привычное круговое движение педалей с движением ног в наиболее нагруженной зоне вниз и немного вперед.

Предложен и рассмотрен один из вариантов привода велосипеда с рычажным механизмом, ведущим звеном которого является привычная для велосипеда каретка с полноповоротным движением педалей [4].

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Принят общий порядок проектирования рычажного механизма. Для синтеза и кинематического анализа выбран механизм с простейшей структурной схемой – четырехзвенный рычажный, а именно кривошипно-коромысловый механизм, который характеризуется круговым движением входного звена и качательным движением выходного. Круговое движение входного звена с педалями на нем выбрано как эргономически обоснованное привычное для велосипеда движение. Наличие муфты свободного хода позволяет получить круговое движение и на выходном звене (заднем колесе). На этапе синтеза определены длины звеньев механизма с учетом геометрических соотношений, накладываемых на раму и кривошпы велосипедов с цепной передачей. Эти соотношения, определенные из эргономических соображений, приняты приоритетными и для велосипеда с кривошипно-коромысловой передачей. Поиск решения в этом случае сводится к определению оптимальной длины шатуна и коромысла. Кинематический анализ выполнен графоаналитическим методом. При моделировании кинематики привода использовались возможности САПР КОМПАС-3D v23 в параметрическом режиме.

ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМА ПРИВОДА

Рама велосипеда (рис. 1) содержит кареточный стакан 1, в котором расположен вал каретки 2 с кривошипами 3 и педалями 4 на них, а также верхние 5 и нижние 6 перья с установленным в них задним колесом 7. Последнее снабжено приводом вращательного движения, который содержит два идентичных кривошипно-коромысловых механизма, расположенных по обе стороны от продольной плоскости рамы. Каждый из механизмов включает в себя шарнирно соединенные кривошип, шатун 8 и коромысло 9. Коромысла соединены со ступицей 10 заднего колеса посредством муфт свободного хода 11 (рис. 2).

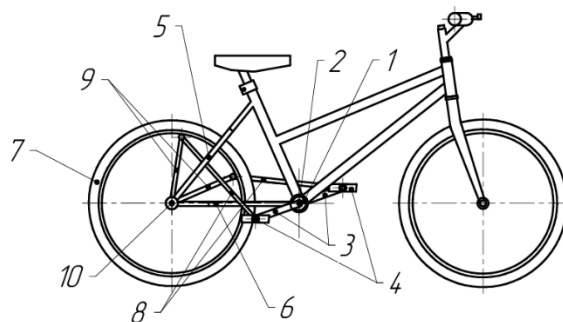


Рис. 1. Схема велосипеда с кривошипно-коромысловым механизмом привода

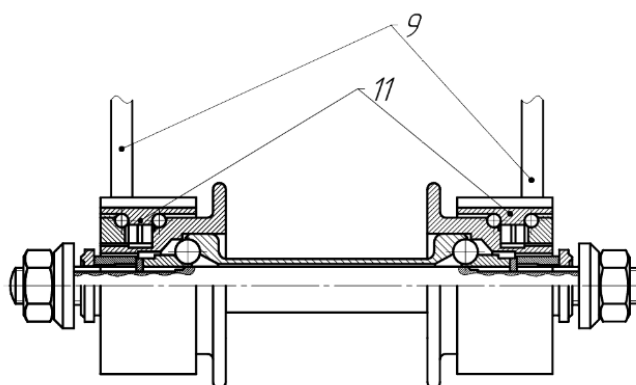


Рис. 2. Схема ступицы заднего колеса с двумя муфтами свободного хода

Под воздействием поочередного надавливания велосипедистом на педали кривошипы вместе с валом каретки совершают круговое, а коромысла – качательное движение. На прямом ходе, во время движения коромысел по ходу вращения заднего колеса, муфты свободного хода передают вращательное движение коромысел на ступицу и заднее колесо в целом. На обратном ходе коромысел муфты свободного хода размыкают их кинематическую связь со ступицей колеса. Кроме того, муфты свободного хода размыкают кинематическую связь и во время движения кривошипов в направлении прямого хода, но с угловой скоростью, при которой угловая скорость коромысла меньше, чем угловая скорость заднего колеса. Наличие в приводе вращательного движения заднего колеса двух идентичных кривошипно-коромысловых механизмов позволяет передавать вращение заднему колесу каждым из них поочередно, увеличивая вдвое продолжительность прямого хода.

ИСХОДНЫЕ ПОСЫЛКИ СИНТЕЗА МЕХАНИЗМА

Цель синтеза механизма – определение размеров механизма и положений его входного звена, наилучшим образом удовлетворяющих заданным условиям и обеспечивающих наилучшее (оптимальное) сочетание качественных показателей.

1. Исходим из того, что геометрические соотношения, накладываемые на раму и кривошип велосипедов с цепной передачей (определенные из эргономических соображений), должны оставаться приоритетными и для велосипеда с кривошипно-коромысловой передачей. Геометрия рамы включает более десяти параметров, в первую очередь длину нижних перьев, провис каретки и длину кривошипа педали. В качестве примера выберем эти три параметра из серии Stinger Reload – качественных хардтейлов для кросс-кантри среднего размера – 18"/29/ (длина подседельного штыря 18 дюймов, диаметр колес 29 дюймов) [5]. При этом длина нижних перьев 445 мм, провис каретки 71,5 мм, длина кривошипа 175 мм. Поиск решения в данном случае сводится к определению оптимальной длины шатуна и коромысла. Предложенная последовательность проектирования может быть применена и для других вариантов из размерных рядов велосипедов XS, S, M, L, XL, XXL.

2. При синтезе привода велосипеда необходимо учитывать такую особенность его работы, как постоянство или плавное изменение скорости выходного звена (колеса) и возможность подстраивания под нее скорости ведущего звена (педалей). Этому способствует большая доля инерционных сил, играющих заметную роль в движении велосипеда, а также (частично) инерционных моментов. Инерция складывается из инерции поступательного движения велосипеда в целом (масса велосипеда плюс масса человека) и вращающихся деталей, в первую очередь ободов, камер и покрышек колес. Принимая, что масса велосипеда 15 кг, велосипедиста – 82 кг, плюс дополнительно приведенная масса вращательно движущихся деталей – 3 кг при окружной скорости, равной поступательной, получим, что кинетическая энергия вращающихся масс составляет только 3 % от общей кинетической инерции велосипеда с человеком. О том, что момент инерции раскрученных колес незначителен по величине и не является основным фактором для удержания равновесия, свидетельствует тот факт, что приведенный в движение без велосипедиста велосипед очень быстро потеряет равновесие и упадет. При этом все же момент инерции раскрученных колес (наряду с постоянным подсознательным подруливанием велосипедиста и заложенным в конструкцию велосипеда кастором рулевой оси) помогает легко поддерживать велосипед в вертикальном положении.

3. Другая особенность связана с возможностью работы привода велосипеда в направлении от колеса к педалям, когда ведущее и ведомое звенья могут меняться местами. Это, как правило, используется в начале движения, когда инерционная составляющая отсутствует. Перед началом движения одну из педалей устанавливают в положение сверху, чуть вперед, а движение начинают отталкиванием от опорной поверхности ногой, т.е. ведущим звеном оказывается заднее колесо. Для того чтобы такой режим работы привода не доставлял неудобств велосипедисту, а также для обеспечения возможности двигаться накатом, без вращения педалей, в приводе устанавливают муфту свободного хода. Применительно к кривошипно-коромысловому механизму привода это означает, что работа привода может происходить в режиме отставания вращения кривошипа от вращения заднего колеса. В этом случае муфта свободного хода будет размыкать кинематическую связь коромысла с задним колесом.

4. Две последние особенности работы привода велосипеда обуславливают следующую, а именно: работа привода носит ярко выраженный циклический характер и сводится к периодическому подталкиванию движущегося по инерции велосипеда, что подтверждают и циклограммы мощности [8]. Таким образом, применение циклично

работающего коромыслового механизма в приводе велосипеда не только возможно, но и целесообразно, что нашло отражение в очередности появления приводных велосипедов – сначала с рычажным и только потом с цепным приводом.

5. Одна из наиболее распространенных задач, обычно решаемых при синтезе, – синтез по условиям передачи сил между звеньями механизма – по допустимому углу давления. Однако большая инерционность работы велосипеда снижает значимость условия по допустимому углу давления. Положение в мертвых точках механизм проходит по инерции. Некритичность ограничения по превышению угла давления в условиях главенства инерционных сил подтверждает и опыт использования кривошипно-ползунных механизмов, в которых при ведомом кривошипе угол давления два раза за цикл принимает максимальное значение, равное 90° . Это положение кривошип проходит только благодаря инерции жестко связанных с ним вращающихся масс [9]. Ограничение угла давления на коромысле может быть в основном оправдано недопущением выстраивания шатуна и коромысла на одной линии для исключения перескока механизма на другую возможную сборку (что, впрочем, можно обеспечить конструктивными мероприятиями, а именно подбором соответствующих длин звеньев).

6. Приведенные выше доводы позволяют сделать вывод о том, что при кинематическом анализе движение коромысла (как и велосипеда в целом) на прямом ходе необходимо принимать равномерным, а движения педалей – как функцию от угловой скорости коромысла. Входным звеном остается кривошип, но скорость его вращения переменная. Ноги велосипедиста подстраиваются под неравномерное движение педалей. В аналогичных условиях находится человек на велосипеде с эллиптической звездочкой [10]. Однако, как показывает опыт, привыкание к новым условиям работы при переходе с круглой на эллиптическую звездочку происходит очень быстро.

7. По указанной причине (в связи с тем, что ноги подстраиваются под неравномерное движение педалей) силовой анализ достаточно сложен для исследования системы «человек – машина» и в рамках данной работы не производился. Для прочностного расчета могут быть приняты данные, известные из опыта применения велосипедов с цепной передачей. Например, коромысло, с учетом действия в нем только растягивающих напряжений, может быть выполнено в виде троса диаметром 3 мм, разрывное усилие для которого составляет 5...6 кН. В качестве кривошипа и коромысла могут использоваться звенья, имеющиеся в велосипедах с цепной передачей. Сомнений в их работоспособности также быть не должно.

СИНТЕЗ МЕХАНИЗМА

Согласно теореме Грасгофа из условия проворачиваемости кривошипа в шарнирном четырехзвеннике [6], кривошип является самым коротким звеном, т.е. коромысло должно быть больше кривошипа [7]. В то же время с отношением длин кривошипа и коромысла связано передаточное число привода, которое при чрезмерном увеличении длины коромысла может выйти за пределы передаточных чисел применяемых в велосипедах передач (0,8...4,7). Меньшие значения используются для горных дорог, большие – для асфальтированных. Из конструктивных соображений длина коромысла ограничена как минимум радиусом колеса (368 мм). Передаточное число в данном случае может принимать минимальное теоретическое значение $u = 175/368 = 0,47$, которое значительно ниже используемых в велосипедах. В связи с этим желательно, чтобы длина коромысла была близка к длине кривошипа. Выберем для рассмотрения свойств механизма длину коромысла 180 мм. Передаточное число в этом случае $u = 175/180 = 0,97$, что вполне удовлетворяет условиям езды по

пересеченной местности. Причем именно такие условия сопровождаются и наиболее интенсивным абразивным износом цепи, что оправдывает применение предлагаемого привода.

План механизма по выбранной схеме в крайних положениях коромысла показан на рис. 3. Длина кривошипа составляет 175 мм, коромысла – 180 мм, длина стойки (расстояние от каретки до втулки заднего колеса) – 445 мм. Длина шатуна 445,3 мм определена исходя из требования получения максимальной передаточной функции скорости, на углах, соответствующих наиболее эффективному надавливанию на педали ($\varphi = 135, 150, 165$ и 180°), путем моделирования кинематики привода в САПР КОМПАС-3D v23 в параметрическом режиме. Установлено, что наиболее близкие к 1 передаточные числа достигаются при приближении вида механизма к шарнирному параллелограмму, т.е. в случае, когда длина коромысла близка к длине кривошипа (но не превышает ее), а длина шатуна – к длине стойки (но не меньше ее). При таких параметрах возможно существование механизма и сохраняется его сборка.

Прямой ход каждого кривошипа начинается и заканчивается в обозначенных соответствующими индексами положениях 1 и 2. При выбранных параметрах рычажного механизма угол прямого хода каждого кривошипа $\alpha = 182^\circ 42'$, т.е. имеет место перекрытие прямых ходов кривошипов на угле поворота $\theta = 2^\circ 42'$. Угол размаха коромысел на прямом и обратном ходах одинаков, $\beta = 142^\circ$. При этом имеет место перекрытие прямых ходов и коромысел. Прямой ход каждого коромысла начинается за $19'$ до завершения прямого хода предшествующего по фазе коромысла и заканчивается через $6'$ после начала прямого хода следующего по фазе коромысла.

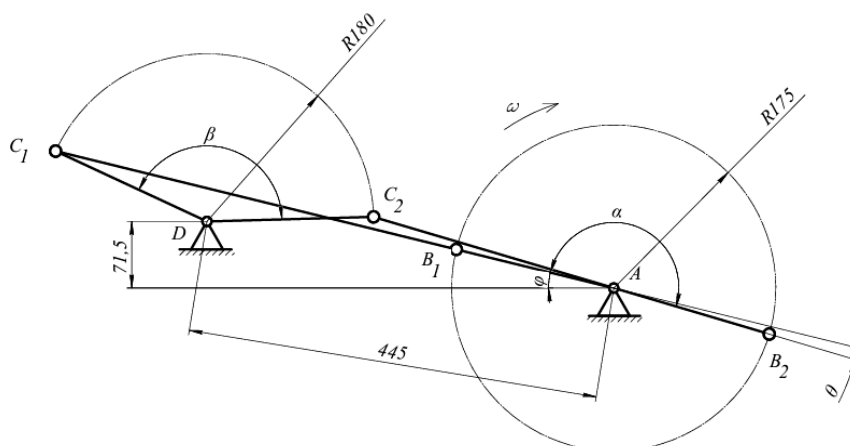


Рис. 3. План механизма в крайних положениях коромысла

Одним из показателей, учитываемых при проектировании рычажного механизма, является коэффициент изменения средней скорости выходного звена – отношение средних угловых скоростей выходного звена при обратном и прямом ходах:

$$K_\omega = \frac{\omega_{\text{обр}}}{\omega_{\text{пр}}}.$$

Вычисляется этот коэффициент через соотношение углов поворота кривошипа за время прямого и обратного хода. Применительно к механизму привода велосипеда может быть использован похожий показатель, где вместо соотношения углов прямого и обратного хода берется отношение угла поворота кривошипа на прямом ходе к углу половины дуги окружности (180°):

$$K = \frac{\alpha}{180^\circ}.$$

С учетом того, что привод содержит два идентичных механизма, которые работают поочередно, физический смысл такого показателя состоит в перекрытии углов прямых ходов левого и правого механизмов привода, обеспечивающем возможность гарантированной непрерывной кинематической связи вала каретки с колесом. При $K \geq 1$ независимо от величины перекрытия работает только один механизм, каждый на угле 180° . Одновременная их работа происходит только в момент обгона одного коромысла другим в начале цикла его работы.

По аналогии с коэффициентом перекрытия в зубчатых передачах K характеризует плавность работы передачи и показывает, насколько один механизм перекрывает работу другого. В нашем примере при $\alpha = 182^\circ 42'$ $K = 1,01$.

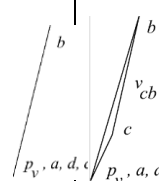
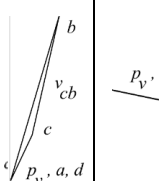
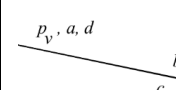
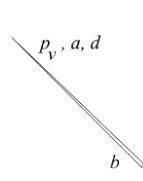
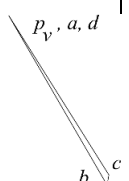
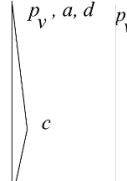
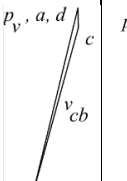
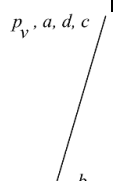
КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ПРИВОДА

Для кинематического анализа принят графоаналитический метод. Он позволяет проанализировать условия передачи движения с ведущего звена (кривошипа) к ведомому (коромыслу). Положение кривошипа задано углом φ наклона кривошипа от горизонтали.

В таблице приведены планы скоростей передаточного механизма для размеров, показанных на рис. 3 на прямом ходе, в положениях, соответствующих началу прямого хода ($\varphi = 13^\circ 41'$), в положении завершения прямого хода предыдущим по фазе механизмом ($\varphi = 16^\circ 23'$), в середине прямого хода коромысла под углом ($\varphi = 101,6^\circ$), а также на углах, соответствующих наиболее эффективному надавливанию на педали ($\varphi = 135, 150, 165$ и 180°), в момент начала прямого хода следующего по фазе механизма ($\varphi = 193^\circ 41'$) а также в конце прямого хода (т. C_2), когда угол наклона кривошипа на $16^\circ 23'$ ниже линии горизонта ($\varphi = 196^\circ 23'$). Там же указаны значения передаточных функций скорости, являющихся отношениями скоростей для выходного и входного звеньев в этих положениях.

В крайних положениях коромысла (т. C_1, C_2) скорости коромысла направлены перпендикулярно общей линии, в которую выстраиваются кривошип и шатун. Скорость коромысла в этих точках равна нулю. Однако вследствие перекрытия прямых ходов в конце прямого хода первого механизма (т. C_2) коромысло следующего по фазе механизма смещается на $25'$ от начальной точки, а его линейная скорость составляет 29 % от линейной скорости кривошипа. В середине прямого хода коромысла ($\varphi = 101,6^\circ$) расхождение между скоростями кривошипа и коромысла меньше 0,01 %, т.е. можно говорить о передаточной функции, равной 1. Представляет интерес определение передаточной функции в конце прямого хода, когда педаль движется вниз-вперед. На участке поворота кривошипа от $\varphi = 13^\circ 41'$ до $\varphi = 16^\circ 23'$, т.е. на угле поворота $2^\circ 42'$, скорость коромысла растет от 0 до 29,3 % от скорости кривошипа, при этом скорость коромысла, заканчивающего прямой ход, уменьшается от 10,0 % до 0. Следовательно, на рассматриваемом участке имеет место перекрытие прямых ходов коромысел двух механизмов, но одно из них ускоряется от неподвижного положения, а второе замедляется до остановки. За данное время происходит смена механизма, приводящего велосипед в движение. При этом движение педали направлено вниз-назад, вдали от положения педали вниз-вперед, в котором давление ноги велосипедиста максимально, что способствует плавной смене механизма, коромысло которого совершает прямой ход.

Планы скоростей и передаточные функции механизма на прямом ходе

Угол на-кло-на криво-шипа φ	13,7°	16,4°	101,6°	135°	150°	165°	180°	193,7°	196,4°
План скоростей механизма									
Переда-точная функ-ция скорости	0	0,29	1	0,98	0,96	0,89	0,64	0,10	0

Кинематический анализ механизма привода показывает его работоспособность. Цикличность работы привода хотя и присутствует, но она присуща любому другому велосипеду с приводом от мускульной силы человека. В положениях кривошипа, при которых велосипедист надавливает на педали наиболее эффективно ($\varphi = 100 \dots 165^\circ$), значение передаточной функции составляет $1 \dots 0,89$, что позволяет говорить об эффективной работе механизма.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Разработанный рычажный привод велосипеда проще по сравнению с известными за счет отказа от применения в передаче зубчатых колес. При этом, по сравнению с известными велосипедами с рычажной механической передачей, ноги велосипедиста совершают более эргономичное круговое движение со смещением ноги при надавливании в наиболее нагруженной зоне вниз и немного вперед, а не назад.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цепь и ее ресурс. О горном велосипеде. Twentysix. URL: <https://twentysix.ru/blog/mountainbike/126709.html> (дата обращения: 09.12.2025).

2. Patent US 4630839. *Propulsion mechanism for lever propelled bicycles* / Marn T. Seol. Filed. Jul. 29. 1985. Date of Patent. Dec. 23. 1986. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/97/e1/08/1b117c5d622a28/US4630839.pdf> (дата обращения: 09.12.2025).
3. NuBike – limited edition V2 Frame & Drive System. URL: <https://www.kickstarter.com/projects/nubikemfg/nubike-limited-edition-v2-frame-and-drive-system/comments> (дата обращения: 09.12.2025).
4. Патент РФ 2859471. *Велосипед* / Головнин А.А., Скворцов И.К. Заявл. 20.06.2025. Оpubл. 02.04.2026, Бюл. № 10.
5. Горные велосипеды Stinger 2024: Genesis, Reload, Graphite, Element, Vega, Laguna. Все, что вы хотели знать. URL: https://pro-bike.ru/article/review-gornye_velosipedy_stinger_2024_genesis_reload_graphite_element_vega_laguna_vse_chto_vu_xoteli_znat-42137.html (дата обращения: 09.12.2025).
6. Фролов К.В., Попов С.А., Мусатов А.К. Теория механизмов и машин / под ред. К.В. Фролова. М.: Высшая школа, 1987. 496 с.
7. Юдин В.А., Петрокас Л.В. Теория механизмов и машин: учебник для втузов. М.: Высшая школа, 1967. 528 с.
8. Comparative biomechanical study of circular and non-circular chainrings for endurance cycling at constant speed // L. Malfait, G. Storme, M. Derdeyn. 2010. URL: <https://noncircularchainring.be/pdf/Biomechanical%20study%20chainrings%20-%20release%202022.pdf> (дата обращения: 09.12.2025).
9. Тимофеев Г.А., Мусатов А.К., Попов С.А., Фролов К.В. Теория механизмов и механика машин: учебное пособие. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 568 с.
10. Why do appropriate non-circular chainrings yield more crank power compared to conventional circular systems during isokinetic pedaling? // L. Malfait, G. Storme, M. Derdeyn, 2012. URL: <https://www.noncircularchainring.be/pdf/Appropriate%20non-circular%20chainrings.pdf> (дата обращения: 09.12.2025).

Для цитирования: Головнин А.А. Синтез и кинематический анализ кривошипно-коромыслового механизма привода велосипеда // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 3 (31). С. 11–20.

SYNTHESIS AND KINEMATIC ANALYSIS OF THE SWING-ROCKER MECHANISM OF A BICYCLE DRIVE

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 and kinematic analysis of the lever mechanism of the rear wheel drive of a bicycle, the leading link of which is the usual bicycle carriage with full-turning movement of the cranks. For synthesis and kinematic analysis, a mechanism with the simplest structural scheme, namely a crank-rocker mechanism, has been selected. The general procedure for designing a lever mechanism has been adopted. The selection and justification of the tasks that must be solved during the synthesis and kinematic analysis process have been provided. The selection is justified by the tasks that must be solved during the synthesis and kinematic analysis process. As an indicator of the mechanism efficiency, it is proposed to use the ratio of the angle of the crank stroke to the angle of half a circle arc

(180°). For the kinematic analysis, the graph-analytical method is adopted. The plans of velocities and the transfer functions of the mechanism for a number of characteristic positions of the mechanism on the working stroke are given.

Keywords: bicycle drive, crank-rocker mechanism, synthesis, kinematic analysis.

Поступила в редакцию/received: 03.04.2026; после рецензирования/revised: 06.04.2026;
принята/accepted: 13.04.2026

УДК 621.941.229.3

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-20-26

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА И ПАТРОНА ДЛЯ УСТАНОВКИ ВАЛА СО ШПОНОЧНЫМ ПАЗОМ НА ЦЕНТРАХ СТАНКА

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук

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

© Архаров А.П., 2026

Представлен анализ известных способов и патронов для установки валов на центрах металлорежущих станков для их последующей обработки. Отмечена актуальность работы по созданию усовершенствованных способа и средства для установки вала со шпоночным пазом. Изложена сущность разработанного способа установки, в котором для передачи крутящего момента от шпинделя станка на вал создается шпоночное сопряжение путем автоматически выполняемых размещения вала на центрах станка и ориентирования его паза относительно кулачка патрона. Раскрыто устройство и принцип действия спроектированного патрона, который, кроме кулачков для удержания вала при его переносе на линию центров, содержит также прижим, препятствующий повороту вала при его ориентировании в угловом направлении. Приведено сравнение по отличительным признакам созданных способа и патрона с аналогичными известными решениями. Отражены оригинальность разработок и достигаемый технический результат.

Ключевые слова: вал, установка, шпоночный паз, способ, упорные центры, кулачковый патрон, шпоночное сопряжение, ориентирование.

ВВЕДЕНИЕ

Современное машиностроение развивается в направлении максимальной автоматизации, сокращения трудоемкости и снижения зависимости от ручного труда. С учетом этого особую актуальность приобретает задача повышения эффективности технологических процессов изготовления валов со шпоночными пазами – распространенных в машиностроении деталей, используемых в редукторах, насосах, электродвигателях и других изделиях [1, 2]. Среди факторов, влияющих на трудоемкость производства таких деталей, можно выделить способ установки их на металлорежущее оборудование и применяемую при этом технологическую оснастку. Одним из распространенных способов является установка валов на центрах станка с применением различных средств для передачи крутящего момента от шпинделя станка к заготовке вала [3, 4]. Применение простых по конструкции поводкового патрона и хомутика, устанавливаемого на заготовку вала вручную [5], упрощает способ

установки, но при этом увеличивается трудоемкость выполняемой операции, а также деформируется поверхность, на которой закрепляется хомутик. Для установки валов на центрах используют способ с применением кулачковых самоцентрирующих патронов [6]. Однако его существенным недостатком является снижение качества закрепляемой поверхности из-за ее деформаций не только от сил закрепления кулачками патрона, но и от одновременного начала закрепления ими. Устранить появление упомянутых дополнительных деформаций позволяет использование способа установки с применением кулачкового патрона с переменным характером движения его кулачков [7]. В то же время исключить деформации поверхности от сил закрепления при этом способе не представляется возможным.

Устранить указанный недостаток позволяет использование способа установки вала со шпоночным пазом на центрах станка [8]. В нем за счет применения установленного на кулачке однокулачкового патрона со шпонкой и фиксатором [9], а также ориентирования вала в угловом направлении с последующим вводом шпонки в шпоночный паз вала достигается создание шпоночного сопряжения, через которое валу при последующей механической обработке передается крутящий момент. Недостатком способа является ручное выполнение приемов по размещению вала на центрах станка и его ориентирование относительно шпонки, что снижает производительность операции и препятствует использованию автоматической загрузки и разгрузки оборудования. Для автоматической установки вала со шпоночным пазом на центрах станка с передачей крутящего момента валу через его упомянутый паз требуется разработка нового способа и патрона. Этой задаче и посвящена данная работа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При исследовании применялся структурный анализ используемых на практике, описанных в научной литературе и в патентной документации методов и средств для установки валов со шпоночными пазами на центрах технологического оборудования с передачей крутящего момента валу через его шпоночный паз. Новые способ и патрон разработаны на основе синтеза таких элементов, которые в совокупности образуют единое целое, отвечающее поставленной задаче и критерию оригинальности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основы разработанного способа принят способ установки вала, содержащего шпоночный паз, на центрах станка. При этом используют кулачковый патрон с упорным центром, шпонкой и фиксатором [9], а путем создания сопряжения шпонки с пазом вала обеспечивают для последующей обработки передачу ему крутящего момента через упомянутое сопряжение [8].

В разработанном способе (рис. 1) используют автоматизированное загрузочное устройство 1 с захватом 2, в котором губками 3 и 4 захвата закреплен устанавливаемый вал 5, а к его поверхности 6 прижат упор 7. Располагают захват с валом над осью упорных центров: переднего 8 и заднего 9, установленных соответственно в однокулачковом механизированном патроне 10 шпинделя 11 станка и в пиноли 12 задней бабки 13 станка. Патрон выполнен с неизменным характером движения его кулачка 14 и с размещенными на кулачке фиксатором 15 и шпонкой 16. Затем перемещают захват к оси центров 8 и 9, располагая вал между центрами в положении, обеспечивающим возможность взаимодействия его шпоночного паза 17 со шпонкой и фиксатором, и прижимая вал поверхностью 18 к упомянутому фиксатору. Размещают вал на упорных центрах, а затем открепляют его путем отвода от него губок. После этого совмещают шпоночный паз с фиксатором путем поворота шпинделя с патроном на полный оборот и заводят фиксатор в упомянутый паз. При этом повороте вала на

центрах с начала поворота шпинделя с патроном и до завершения захода фиксатора в паз препятствует момент сопротивления от силы прижатия упора к поверхности. Затем вместе с патроном поворачивают вал до завершения полного оборота за счет того, что крутящий момент, передаваемый валу через фиксатор, превышает момент сопротивления от силы прижатия упора, а потом останавливают поворот. После этого перемещают кулачок в радиальном направлении в сторону сближения с валом, заводя при этом шпонку в шпоночный паз, а затем отводят захват от вала в радиальном направлении. Упомянутый полный оборот позволяет выполнить взаимное ориентирование фиксатора и шпоночного паза независимо от их первоначального углового положения.

Таким образом, все элементы способа установки вала на центрах станка с обеспечением передачи крутящего момента валу через шпоночный паз выполняются без участия рабочего.

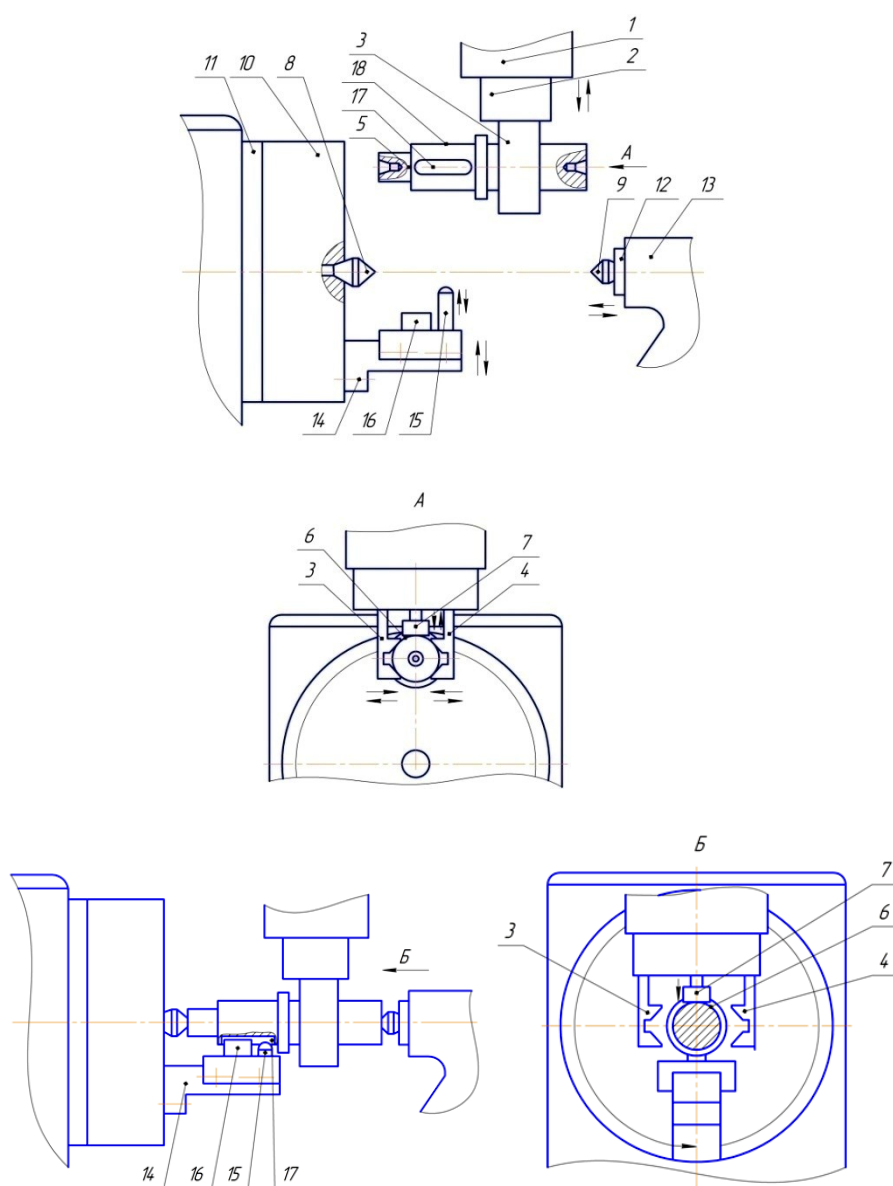


Рис. 1. Схема способа установки вала со шпоночным пазом на центрах станка

Для осуществления разработанного способа необходим механизированный патрон, который удерживал бы вал от поворота на центрах при его ориентировании в угловом направлении. При разработке такого патрона за основу был взят двухкулачковый механизированный самоцентрирующий патрон [10].

Спроектированный патрон загрузочного устройства (рис. 2) устроен следующим образом.

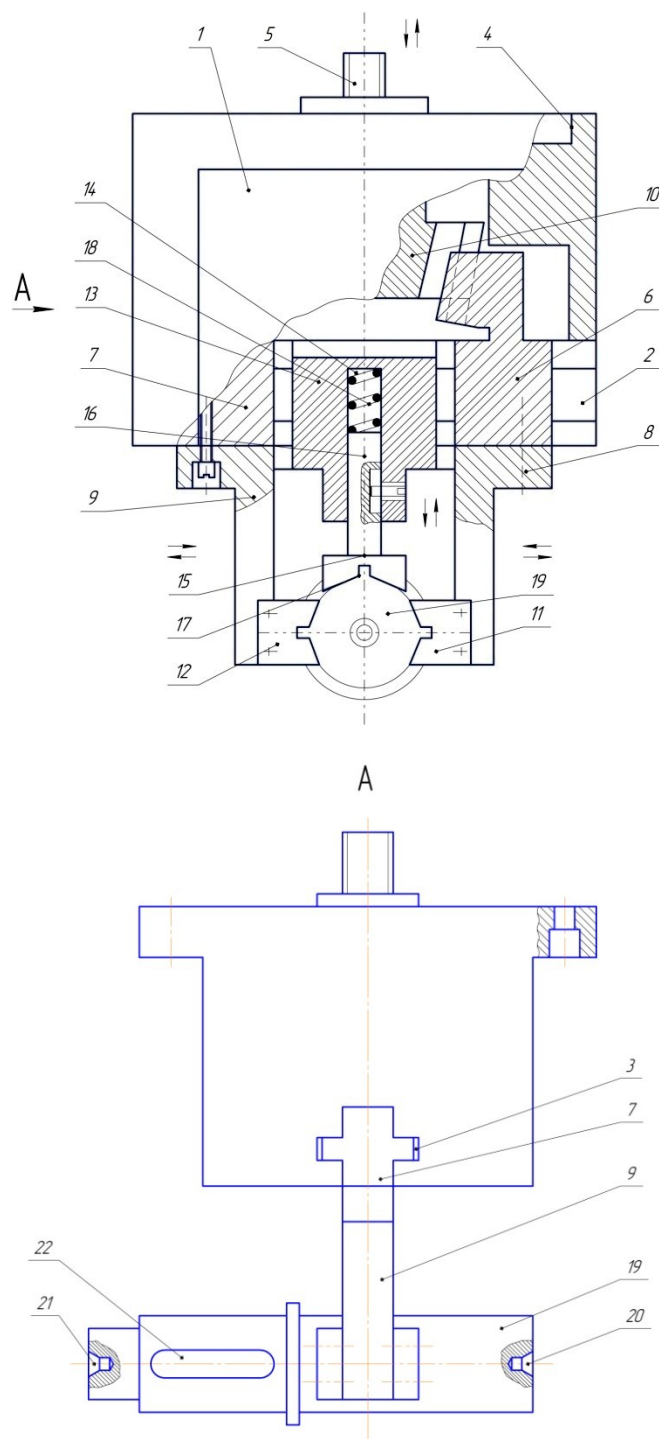


Рис. 2. Патрон загрузочного устройства для установки вала со шпоночным пазом на центрах станка

Патрон загрузочного устройства содержит корпус 1 с радиальными пазами 2 и 3 на первом его торце и с центрирующим пояском 4 на втором торце, шток 5, ползуны 6 и 7 с кулачками 8 и 9, размещенные соответственно в радиальных пазах, механизм преобразования 10 осевого перемещения штока в радиальные движения кулачков, размещенный в корпусе, призматические губки 11 и 12, закрепленные на кулачках, фланец 13 с глухим отверстием 14, прижим 15 с хвостовиком 16 и наездником 17 и пружину 18. Фланец закреплен на первом торце корпуса соосно своим глухим отверстием относительно центрирующего пояса. Прижим размещен хвостовиком в глухом отверстии с возможностью его перемещения вдоль оси упомянутого отверстия и прижатия наездником к устанавливаемому валу 19. Пружина размещена между дном глухого отверстия и хвостовиком. При этом биссекторная плоскость наездника расположена симметрично относительно оси упомянутого отверстия, а биссекторные плоскости призматических губок – симметрично друг к другу. Патрон центрирующим пояском установлен на загрузочном устройстве (на рис. 2 не показано).

Патрон загрузочного устройства работает следующим образом.

Устанавливаемый вал с центровыми отверстиями 20 и 21 и шпоночным пазом 22 размещают между призматическими губками. От привода сообщают движение штоку. Это осевое движение с помощью механизма 10 преобразуется в радиальные перемещения ползунов с кулачками и призматическими губками. Перемещения губок приводят к центрированию и закреплению вала. При этом прижим, смещаясь под действием пружины, своим наездником прижимается к валу. Располагают патрон загрузочного устройства с валом над осью переднего и заднего упорных центров (на рис. 2 не показаны), а затем, как это описано в разработанном способе, ориентируют шпиндель с патроном станка относительно шпоночного паза вала путем поворота шпинделя на полный оборот. Перед такой ориентацией открепляют вал за счет отвода от него призматических губок. В то же время вал удерживают от поворота на центрах станка с помощью наездника.

По сравнению с известным патроном [10] разработанный патрон загрузочного устройства позволяет создать на валу два момента сопротивления: основной момент – в результате закрепления вала призматическими губками упомянутого патрона и дополнительный – от силы прижатия наездника к поверхности вала. После размещения вала на центрах станка основной момент исключается за счет открепления вала губками, а дополнительный продолжает действовать, благодаря чему предотвращается поворот вала при угловом ориентировании фиксатора относительно шпоночного паза вала до того момента, пока фиксатор завершит перемещение в шпоночный паз.

Таким образом выполняется установка вала со шпоночным пазом на центрах станка с использованием патрона загрузочного устройства и с обеспечением передачи валу крутящего момента от шпинделя через сопряжение шпонки с упомянутым пазом. Патрон может быть использован в области металлообработки при загрузке заготовок в виде валов со шпоночными пазами на технологическое оборудование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ используемых способов и патронов для установки заготовок в виде валов на технологическом оборудовании выявил их достоинства и недостатки. Применение загрузочного устройства в разработанном способе позволяет размещать вал на центрах без использования ручного труда. Оснащение спроектированного патрона дополнительным прижимом обеспечивает возможность автоматической ориентации шпоночного паза вала относительно шпонки с последующим созданием ими шпоночного сопряжения. В результате использования

упомянутых технологических средств снижается трудоемкость установки валов со шпоночными пазами на металлорежущие станки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технология машиностроения: учебное пособие для вузов. В 2 кн. Кн. 1: Основы технологии машиностроения / Э.Л. Жуков [и др.]; под ред. С.Л. Мурашкина. М.: Высшая школа. 2008. 278 с.
2. Беспалов Б.Л., Глейзер Л.А., Колесов И.М. Технология машиностроения: учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1973. 448 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / А.М. Дальский [и др.]. М.: Машиностроение-1, 2003. Т. 1. 912 с.
4. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.М. Дальского [и др.]. М.: Машиностроение-1, 2001. Т. 2. 944 с.
5. ГОСТ 2571-71. Патроны токарные поводковые. М.: Изд-во стандартов, 1981. 7 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. М.: Инновационное машиностроение, 2023. Т. 2. 818 с.
7. 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.
8. Архаров А.П. Установка вала со шпоночным пазом на центрах станка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 3 (23). С. 39–44.
9. Патент РФ 2836426. *Патрон для установки вала со шпоночным пазом на центрах станка* / Архаров А.П. Заявл. 13.03.2024. Опубл. 14.03.2025, Бюл. № 8.
10. ГОСТ 24351-80. Патроны токарные самоцентрирующие трех- и двухлапчатые клиновые и рычажно-клиновые. М.: Изд-во стандартов, 1988. 11 с.

Для цитирования: Архаров А.П. Усовершенствование способа и патрона для установки вала со шпоночным пазом на центрах станка // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 3 (31). С. 20–26.

THE METHOD AND THE CHUCK FOR MOUNTING A KEYWAY SHAFT ON MACHINE CENTERS IMPROVEMENT

A.P. Arkharov, Cand. Sc.

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

An analysis of known methods and chucks for installing shafts on the centers of metal-cutting machines for the processing is presented. The relevance of the work on creating a method and means for installing a shaft with a keyway is noted. The essence of the developed installation method is outlined, in which a keyway coupling is created to transfer torque from the machine spindle to the shaft by automatically placing the shaft on the machine centers and orienting its groove relative to the chuck jaws. The device operating and principle of the designed jaw chuck are disclosed, which also contains a clamp that prevents the shaft from turning when it is oriented in an angular direction as well as jaws for holding the shaft when it

is transferred to the center line. Comparative analyzes on the distinguishing features of the created method and chucks with similar known solutions were carried out. The development originality and the achieved technical result are reflected.

Keywords: shaft, installation, keyway, method, thrust centers, jaw chuck, keyway coupling, orientation.

Поступила в редакцию/received: 02.02.2026; после рецензирования/revised: 27.02.2026;
принята/accepted: 11.03.2026

УДК 621.785.616

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-26-32

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА В БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ

К.А. САХАРОВ, ассистент

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: akad.ka.3000@yandex.ru

© Сахаров К.А., 2026

Методами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа исследованы микроструктура и химический состав быстрорежущей стали марки Р6М5 после лазерной закалки и лазерного отпуска. В зоне лазерной закалки из жидкой фазы практически все первичные карбиды растворяются в матрице, что позволяет получить структуру высоколегированных твердых растворов и снизить риск преждевременного выхода из строя инструментов из-за выкрашивания крупных карбидов в режущей кромке. Установлены закономерности формирования микроструктуры и распределения основных легирующих элементов.

Ключевые слова: микроструктура, быстрорежущая сталь, многоканальный лазер, растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования по воздействию лазерного излучения на вещество проводятся начиная с появления первых лазерных систем [1]. В настоящее время в области лазерных технологий достигнуты значительные успехи, интенсивно развиваются и получили широкое практическое применение резка, сварка, наплавка, термообработка, ударное воздействие и др. [2]. Упрочнение рабочих поверхностей инструментов лазерным излучением – один из современных способов формирования требуемой микроструктуры, обеспечивающей улучшенный комплекс механических и эксплуатационных свойств [3–5].

Как известно, основными свойствами быстрорежущих сталей являются высокие твердость 63–67 HRC, прочность и теплостойкость (600–700 °С), а также износостойкость за счет легирования вольфрамом, молибденом, хромом, ванадием и кобальтом; использованием сложной технологии упрочнения, включающей высокотемпературную закалку с нагревом до 1 210–1 280 °С и последующим трехкратным отпуском при температуре 560 °С [6]. При изготовлении (методами литья,ковки, отжига) и упрочнении быстрорежущих сталей по традиционной технологии значительная часть легирующих элементов остается в крупных труднорастворимых

при нагреве карбидах и практически не участвует в обеспечении необходимых свойств. Негативным фактором свойством быстрорежущих сталей, изготовленных по стандартной технологии, является карбидная неоднородность, которая в свою очередь приводит к образованию дефектной зоны в области границы «карбид – матрица», вследствие чего происходит выкрашивание крупных карбидов в режущей кромке и преждевременный выход из строя инструмента [7, 8].

Преимущество лазерной обработки составляют высокие скорости нагрева и охлаждения за счет локализации излучения на поверхности обрабатываемого материала. В результате формируется структура с повышенной на 3-4 единицы HRC твердостью и износостойкостью по сравнению со стандартной обработкой [5, 6]. Основными структурными составляющими после лазерного упрочнения являются мелкоигольчатый мартенсит и остаточный аустенит. Негативное влияние на эксплуатационные свойства инструмента оказывает остаточный аустенит, присутствие которого снижает твердость и теплостойкость, если речь идет об инструменте для высокоскоростной обработки резанием [2, 8, 9]. Для штамповой оснастки объемного деформирования деталей небольшая доля остаточного аустенита в металлической матрице может благоприятно влиять на взаимодействие структурных составляющих и повышать стойкость инструмента [4].

Разработка и внедрение технологии лазерной термообработки, как с оплавлением поверхности, так и без оплавления, направлены в первую очередь на устранение вышеперечисленных недостатков в быстрорежущих сталях, изготовленных методом литья,ковки и отжига. Добиться значительного снижения количества остаточного аустенита и формирования более однородной дисперсной структуры позволяет комплексный подход. Он включает в себя лазерную закалку с оплавлением поверхности для максимального растворения крупных первичных карбидов и получения высоколегированных твердых растворов мартенсита и аустенита. Далее необходимо устранение остаточного аустенита и упрочнение стали с помощью процессов дисперсионного твердения, которые происходят при отпуске [6, 10, 11]. Лазерная закалка относится к поверхностным способам упрочнения, поэтому нагревать все изделие при отпуске нецелесообразно. В настоящей работе рассмотрена возможность применения после лазерной закали лазерного отпуска.

Сталь, упрочненная лазерным излучением, имеет сложную слоистую структуру и разные физико-механические характеристики по глубине воздействия [5]. Особенности структурообразования, связанные с высоким легированием тугоплавкими элементами, затрудняют эффективное управление структурой и свойствами при лазерной обработке. Это направление до сих пор изучено недостаточно полно. Цель работы – исследование микроструктуры и распределения легирующих элементов в быстрорежущей стали марки P6M5 после лазерной закали с оплавлением поверхности и лазерного отпуска.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы стали марки P6M5 (ГОСТ 19265-73) после объемной закали и трехкратного отпуска при температуре 560 °С упрочнялись с помощью многоканального (40 лучей) CO₂-лазера на автоматизированном комплексе АЛТКУ-3. Мощность непрерывного лазерного излучения составляла 2,5 кВт, скорость сканирования 10 мм/с, диаметр пятна лазерного излучения на поверхности заготовки 6 мм. Сразу после лазерной закали на этом же комплексе выполняли лазерный отпуск. Параметры лазерного излучения оставались прежними, за исключением мощности, которая составляла 0,8 кВт.

Экспериментальные исследования полученных образцов проводили на поперечных металлографических шлифах. Микроструктуру стали в зоне лазерного воздействия исследовали методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе JEOL JSM-6610LV. Распределение легирующих компонентов в плоскости шлифов методами рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) выполняли на энергодисперсионном спектрометре Oxford INCA Energy 350. Микротвердость измеряли на отечественном микротвердомере ПМТ-3 согласно ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В связи с тяжелыми условиями эксплуатации к быстрорежущим сталям предъявляются высокие требования в отношении износо- и теплостойкости, твердости, прочности [6]. Уже более ста лет, с момента появления этого материала, карбиды находятся в центре внимания исследователей, поскольку они влияют на эксплуатационные характеристики быстрорежущих сталей. Установление взаимосвязи между карбидами, как важными фазовыми компонентами, и легирующими элементами является необходимым условием для дальнейшего повышения свойств быстрорежущих сталей.

На рис. 1а представлено РЭМ-изображение микроструктуры стали Р6М5, упрочненной по стандартной технологии. Металлическая матрица в основном состоит из мартенсита, в ней распределены карбиды, имеющие глобулярную форму. Микротвердость стали около 8 200 МПа.

После лазерной закалки из жидкой фазы формируется ячеистая микроструктура (рис. 1б), дендритные ячейки имеют размер 4,5...5 мкм. При лазерном плавлении стали практически все первичные карбиды растворились в матрице. При кристаллизации расплава произошло повторное образование карбидной фазы и изменилась ее морфология. Карбиды выделились в виде тонких прослоек шириной 0,2...0,3 мкм по границам дендритных ячеек и представляют собой прерывистую сетку. Микротвердость стали около 8 500 МПа.

При лазерном отпуске (рис. 1в) происходят процессы распада остаточного аустенита и выделение дисперсных карбидов. Изменения в фазовом составе положительно влияют прежде всего на такие свойства стали, как твердость и теплостойкость. Микротвердость увеличилась до 8 800 МПа.

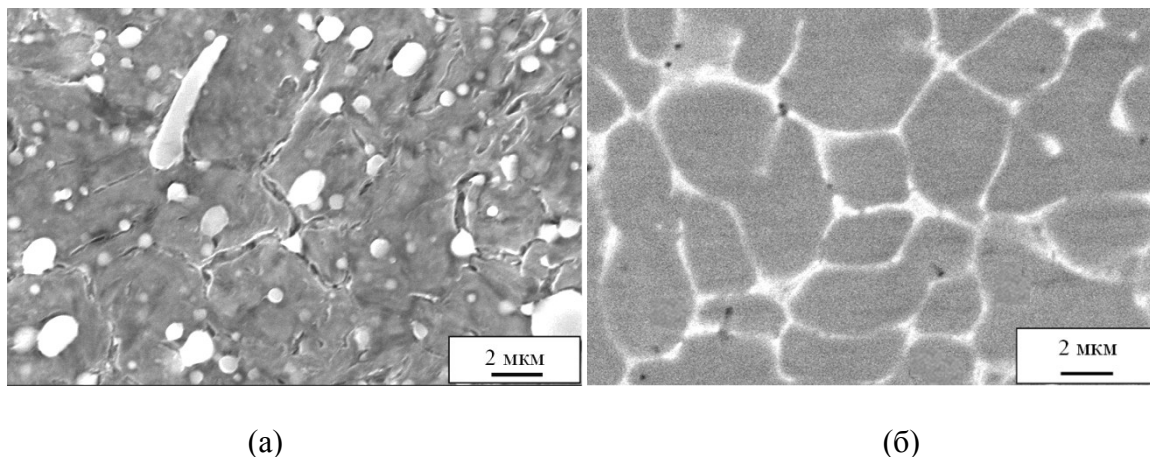
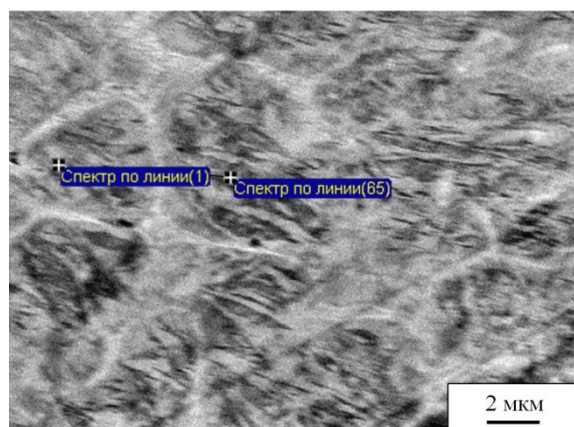


Рис. 1. Микроструктура стали Р6М5: после закалки и трехкратного отпуска (а); в зоне лазерной закалки (б); лазерного отпуска (в).

Символом ■ отмечены границы набора рентгеновских спектров вдоль линии



(в)

Рис. 1. Продолжение

В настоящей работе с помощью энергодисперсионного спектрометра, который является аналитической приставкой к РЭМ, проведен количественный и качественный анализ распределения химических элементов в выбранной области, отмеченной на рис. 1в. Исследования состава стали проводили вдоль линии в 65 точках с шагом 0,1 мкм.

При РСМА анализируется химический состав микрообъема материала, в котором происходит возбуждение рентгеновского излучения (область генерации) электронным пучком. Размеры микрообъема определяются диаметром электронного пучка и свойствами исследуемого вещества. При этом минимальный размер области генерации составляет около одного микрометра и не изменяется при дальнейшем уменьшении диаметра пучка. Таким образом, РСМА позволяет исследовать состав образца с микронным разрешением.

Рентгеноспектральный микроанализ быстрорежущей стали Р6М5 проводили после лазерного отпуска. На рис. 2 показан один из полученных спектров, на рис. 3 данные РСМА представлены графически.

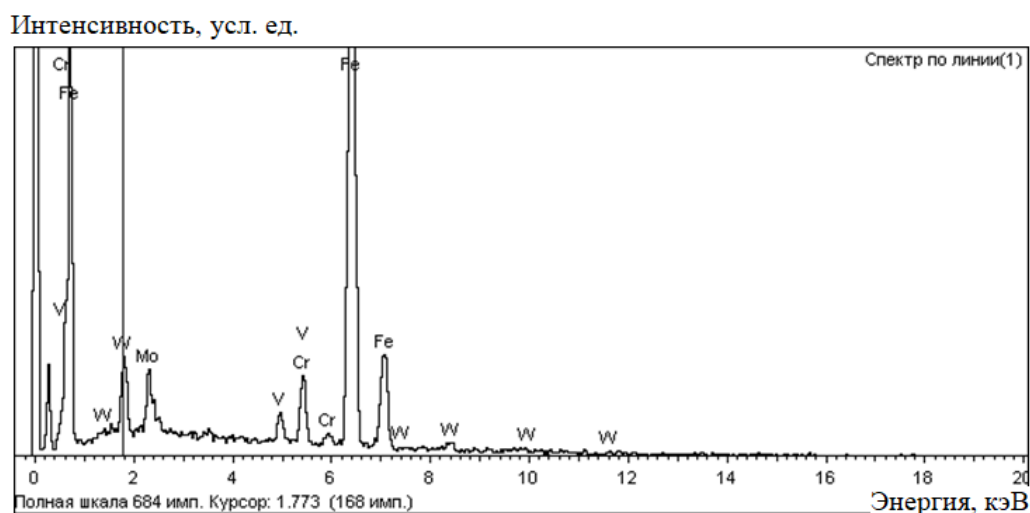


Рис. 2. Пример энергетического спектра эмитированного рентгеновского излучения, полученного в первой точке на линии

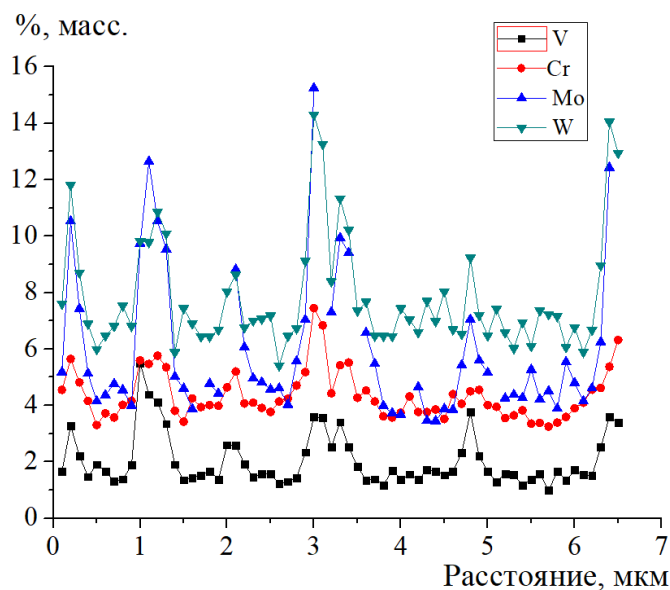


Рис. 3. Распределение массового содержания химических элементов по спектрам

Механические свойства быстрорежущих сталей в основном зависят от их химического состава и микроструктуры. Карбиды являются важнейшей фазовой составляющей. Механизмы образования, морфология и распределение карбидов в стали зависят от легирующих элементов. Анализ данных РСМА показывает значительную неоднородность распределения в составе стали карбидообразующих элементов – вольфрама, молибдена, хрома и ванадия. Этот факт, а также повышение микротвердости на 300 МПа может свидетельствовать об образовании дисперсных карбидов в процессе лазерного отпуска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Лазерная закалка из жидкой фазы позволяет растворить крупные первичные карбиды и получить структуры высоколегированных твердых растворов. Последующий лазерный отпуск способствует протеканию процессов дисперсионного твердения, о чем свидетельствует неравномерное распределение легирующих элементов в стали и повышение микротвердости до 8 800 МПа. Для инструментов, упрочненных данным способом, снижается риск преждевременного выхода из строя из-за выкрашивания крупных карбидных включений в режущей кромке.

БЛАГОДАРОСТИ

Исследования микроструктуры и элементного химического состава были выполнены в лаборатории электронной микроскопии Центра коллективного пользования научной аппаратурой и оборудованием Тверского государственного университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Токарев Д.И., Дроздов А.А., Морозов Е.А., Абляз Т.Р., Иванова Ю.С., Полежаев И.С. Влияние лазерного воздействия на состояние закаленной быстрорежущей стали Р6М5 // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2019. Т. 21. № 4. С. 34–41.
2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной поверхностной обработки. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. 376 с.

3. Думанский И.О., Думанский А.И. Особенности лазерного упрочнения металлорежущего инструмента из быстрорежущей стали / *Перспективные научные исследования: опыт, проблемы и перспективы развития: Сб. научн. статей по материалам V Международной научно-практической конференции*. Уфа: Научно-издательский центр «Вестник науки», 2021. С. 44–48.

4. Степанкин И.Н., Верещагина Л.С., Поздняков Е.П., Девойно О.Г., Веремей П.В. Влияние лазерной модификации на эксплуатационные характеристики стали Р6М5 // *Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого*. 2015. № 1 (60). С. 19–26.

5. Афанасьева Л.Е. Формирование структуры и свойств быстрорежущей стали при лазерном упрочнении // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Физика»*. 2015. № 1. С. 5–20.

6. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. Изд. 5-е, перераб. и доп. М.: Металлургия, 1983. 528 с.

7. 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.

8. Адаскин А.Д., Кремнев Л.С., Сапронов И.Ю. О разрушении ледебуритных и заэвтектоидных быстрорежущих сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. № 6 (672). С. 23–28.

9. Кремнев Л.С. Теория легирования и создание на ее основе теплостойких инструментальных сталей и сплавов оптимального состава // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2008. № 11. С. 18–28.

10. Chen Y., Ye C., Chen X., Zhai Q., Hu H. Effect of alloying and microalloying elements on carbides of high-speed steel: an overview // *Metals*. 2024. V. 14. № 2. P. 175.

11. Kozakov A.T., Yares'ko S.I., Sidashov A.V., Manturov D.S., Novikov V.A., Novikov E.S., Kuznetsov S.I., Marunovich O.V. Surface properties of heat-resistant W9Mo4Co6Si tool steel after laser heat treatment and their correlation with material properties in a nanoloaded tribosystem // *Materials Chemistry and Physics*. 2025. V. 344. P. 131082.

Для цитирования: Сахаров К.А. Распределение элементного состава в быстрорежущей стали после лазерного упрочнения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 3 (31). С. 26–32.

DISTRIBUTION OF ELEMENTAL COMPOSITION IN HIGH-SPEED STEEL AFTER LASER HARDENING

K.A. SAKHAROV, Assistant

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: akad.ka.3000@yandex.ru

Scanning electron microscopy and X-ray diffraction microanalysis were used to study the microstructure and chemical composition of P6M5 high-speed steel after laser hardening and laser tempering. In the laser hardening zone, almost all primary carbides dissolve in the matrix from the liquid phase, resulting in a highly alloyed solid solution structure and

reducing the risk of premature tool failure due to chipping of large carbides in the cutting edge. Patterns of microstructure formation and the distribution of the main alloying elements were established.

Keywords: microstructure, high-speed steel, multichannel laser, scanning electron microscopy, X-ray microanalysis.

Поступила в редакцию/received: 27.04.2026; после рецензирования/revised: 30.04.2026;
принята/accepted: 05.05.2026

УДК 621.03

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-32-40

ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСТРУКТУРЫ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, Л.Е. АФАНАСЬЕВА, канд. физ.-мат. наук,
М.В. НОВОСЕЛОВА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., 2026

Показана возможность использования уравнений энергетического баланса для оценки энергозатрат при нанесении и модификации износостойкого покрытия состава NiCrBSi на стальную поверхность с помощью порошковой лазерной наплавки. Для оценки энергетического вклада лазерного излучения в обрабатываемый материал использован ряд параметров: размерная и безразмерная энтальпии, плотность энергии, комплекс технологических параметров процесса. Рассмотрено влияние энергетических параметров на микроструктуру покрытия. Количественной характеристикой микроструктуры служит расстояние между дендритными ветвями второго порядка (дендритный параметр). Оптимизируя величину соответствующих энергетических параметров при наплавке или лазерной модификации поверхности по величине дендритного параметра, можно получить структуру покрытия, обеспечивающую требуемые механические свойства, в частности микротвердость и износостойкость.

Ключевые слова: лазерная наплавка, энергетические параметры, энергетический баланс, дендритный параметр.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных способов повышения надежности технических устройств является выбор материалов, характеристики которых соответствуют условиям эксплуатации изделия. Хорошо известно, что в подавляющем большинстве случаев причина отказа оборудования заключается в изнашивании фрикционных узлов, которые представляют собой неотъемлемую часть многих ответственных технических систем. В связи с этим актуальна задача разработки и применения износостойких материалов. К таким перспективным материалам относятся сплавы системы легирования NiCrBSi, обладающие высокой износостойкостью, коррозионной

стойкостью, жаростойкостью. Покрытия состава NiCrBSi применяются как при изготовлении новых, так и при восстановлении изношенных деталей. Нанесение таких покрытий на рабочие поверхности изделий может осуществляться различными способами, в том числе порошковой лазерной наплавкой.

Для повышения эффективности технологии лазерной наплавки исследуется влияние основных технологических параметров (мощности излучения, скорости сканирования, диаметра луча) на характеристики покрытия, в том числе с использованием анализа энергетического баланса процесса [1–3]. Так, в работе [3] выполнен теоретический анализ энергетических и микроструктурных аспектов процесса лазерного синтеза порошкового сплава на никелевой основе Inconel 718 (50–55 % Ni) и показана их взаимосвязь. Микроструктурный фактор играет ключевую роль в обеспечении высоких механических и триботехнических характеристик никелевых сплавов [4, 5].

Цель данной работы – на примере сплава NiCrBSi с помощью анализа энергетического баланса оценить влияние основных технологических параметров на энергетические критерии процесса лазерного плавления и характеристики микроструктуры полученного покрытия.

ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Порошковую наплавку выполняли с помощью многоканального (48 лучей) CO₂-лазера на комплексе модели ЦЛТ-Ю-5. Для наплавки использовали порошковый присадочный материал на никелевой основе марки ПГ-19Н-01, не требующий специальной защиты ванны расплава от отрицательного воздействия окружающей среды [5, 6]. Материалом подложки служила углеродистая конструкционная сталь 30. Порошковый материал предварительно наносили на поверхность основы с помощью специального трафарета размерами 70 × 70 × 1 мм, выравнивали по толщине и расплавляли непрерывным лазерным излучением с перекрытием валиков 30 %. Затем последовательно наплавляли второй и третий слой. Химический состав полученного покрытия приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав покрытия

Элемент	Cr	B	Si	Al	Fe	C	Ni
Массовая доля, %	3,9–14,0	1,7–2,5	1,2–3,2	0,8–1,3	3,2–5,0	0,3–0,6	Ост.

После наплавки одну часть поверхности покрытия переплавляли по режиму 1, другую – по режиму 2 (табл. 2) с применением того же лазерного комплекса.

Таблица 2. Режимы лазерного плавления

Обработка	Мощность излучения W , Вт	Скорость сканирования лазерного луча v , мм/с	Диаметр лазерного пятна d_n , мм
Наплавка	2 300	5	6
Плавление по режиму 1	2 000	10	
Плавление по режиму 2	2 700	10	

Микроструктуру образцов исследовали с помощью металлографического микроскопов Carl Zeiss Axio Vert.A1 MAT и РЭМ JEOL JSM-6610LV. Рентгеноспектральный микроанализ выполняли на энергодисперсионном спектрометре Oxford INCA Energy 350. Микротвердость измеряли по методу восстановленного отпечатка на приборе ПМТ-3 согласно ГОСТ 9450-76 при усилии 0,98 Н.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

При теоретическом анализе процессов лазерной обработки в качестве количественных характеристик энергетического вклада лазерного излучения используются различные параметры:

объемная q_V , поверхностная q_S и линейная q_L плотности энергии [3, 7–10]:

$$q_V = \frac{AW}{v d_n h}; \quad (1)$$

$$q_S = \frac{AW}{v d_n}; \quad (2)$$

$$q_L = \frac{AW}{v}, \quad (3)$$

где A – поглощательная способность порошкового материала; h – толщина слоя порошкового материала;

размерная ΔH и безразмерная $\Delta H/H_s$ энтальпии:

$$\Delta H = \frac{AW}{\pi \sqrt{\chi v d_n^3}} [1, 2, 7]; \quad (4)$$

$$\frac{\Delta H}{H_s} = \frac{\Delta H}{c_p \rho (T_m - T_0)} [7]; \quad (5)$$

$$\frac{\Delta H}{H_s} = 2^{3/4} \cdot \frac{\Delta H}{c_p \rho T_m} [1, 2], \quad (6)$$

где χ – температуропроводность; c_p – удельная теплоемкость; ρ – плотность; T_m и T_0 – температура плавления и исходная температура порошкового материала;

размерный параметр [1] $AW/\sqrt{v d_n^3}$, Вт · с^{0,5}/мм², полученный из выражения (4) для размерной энтальпии ΔH исключением величины теплопроводности χ .

Из формул (1)–(3) видно, что в одном и том же технологическом процессе при постоянных величинах h и d_n энергетические параметры q_V , q_S и q_L однозначно связаны.

Достоинство безразмерного параметра $\Delta H/H_s$ в его независимости от единиц измерения. Достоинство размерного параметра $AW/\sqrt{v d_n^3}$ в том, что он включает технологические параметры обработки, которые известны достаточно точно, и не зависит от физических параметров материала, которые непросто определить для порошковых композиций. При этом размерный характер параметра требует обязательного указания единиц измерения.

Величины $H_s = c_p \rho (T_m - T_0)$ в формуле (5) и $H_s = c_p \rho T_m$ в формуле (6) можно рассматривать как энергозатраты на нагревание единичного объема материала от исходной температуры T_0 до температуры плавления T_m . По нашему мнению, с

физической точки зрения в параметр H_S , характеризующий процесс лазерной наплавки, необходимо включить энергозатраты на плавление материала:

$$H_S = \rho[c_p(T_m - T_0) + L_{пл}], \quad (7)$$

где $L_{пл}$ – удельная теплота плавления. Тогда безразмерная энтальпия определяется выражением

$$\frac{\Delta H}{H_S} = \frac{\Delta H}{\rho[c_p(T_m - T_0) + L_{пл}]}. \quad (8)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Макроструктура поперечного сечения шлифа полученного образца с лазерной наплавкой покрытия на основе никеля представлена на рис. 1, а значения энергетических параметров, характеризующих процесс наплавки и последующей модификации поверхности покрытия, приведены в табл. 3. Из рис. 1 видно, что толщина покрытия составляет примерно 2 мм, ниже располагается зона термического влияния.

При воздействии лазерного излучения на обрабатываемый материал, связанном с его плавлением (лазерная наплавка, селективное лазерное плавление), возможны два режима плавления – режим теплопроводности и режим «замочной скважины» (keyhole) [7], он же режим кинжального проплавления [1].

В первом случае энергия лазерного излучения распространяется в материале за счет теплопроводности, при этом ванна расплавленного металла имеет форму, близкую к полусфере с относительно небольшой глубиной.

Во втором случае происходит интенсивное испарение металла, в результате чего образуется узкий глубокий канал и ванна расплавленного металла приобретает форму, схожую с формой замочной скважины. Этот режим в данном случае нежелателен, так как при его использовании возможно, во-первых, глубокое проплавление подложки и заметное перемешивание материалов подложки и покрытия, а во-вторых, образование пор.

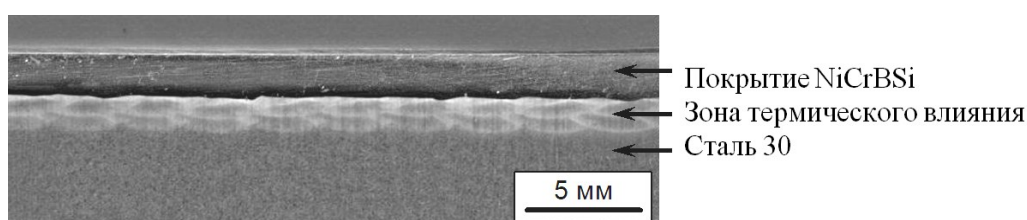


Рис. 1. Макроструктура поперечного шлифа образца с покрытием

Таблица 3. Энергетические параметры процесса лазерной наплавки

Обработка	q_V , Дж/мм ³	q_L , Дж/мм	$AW / \sqrt{vd_{п}^3}$, Вт · с ^{0,5} /мм ²	$\Delta H/H_S$ (формула (8))
Наплавка	57,5	345	52,5	1,10
Плавление по режиму 1	25,0	150	32,3	0,68
Плавление по режиму 2	33,8	203	43,6	0,91

Эксперименты [1] показали, что для порошкового материала близкого состава – NiCrBSi + WC – режим теплопроводности наблюдается при малых значениях параметра $AW/\sqrt{vd_{\text{п}}^3} \leq 300 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{0,5}/\text{мм}^2$. Значения этого параметра (см. табл. 3) намного меньше, и это дает основания считать, что в нашем случае наплавка происходила в режиме теплопроводности, характеризующемся относительно небольшой глубиной ванны расплава (0,25–0,4 от ее ширины [10–12]).

Значения безразмерной энтальпии $\Delta H/H_s$, рассчитанные по формуле (8), для исходной наплавки немного больше единицы, т.е. поглощенной энергии лазерного излучения достаточно не только для полного расплавления исходного порошкового материала, но и для подплавления нижележащего материала (подложки или предыдущего слоя наплавки). Этим обеспечивается прочное сцепление наплавки с подложкой и высокое качество самой наплавки. С другой стороны, при таком значении $\Delta H/H_s$ глубина проплавления подложки должна быть небольшая, что подтверждается рис. 1. В результате исключается значительное перемешивание материалов покрытия и подложки, которое могло повлиять на механические свойства покрытия. Подтверждением служит рис. 2, где представлено распределение никеля (основного материала покрытия) и железа (основного материала подложки) по глубине покрытия [6].

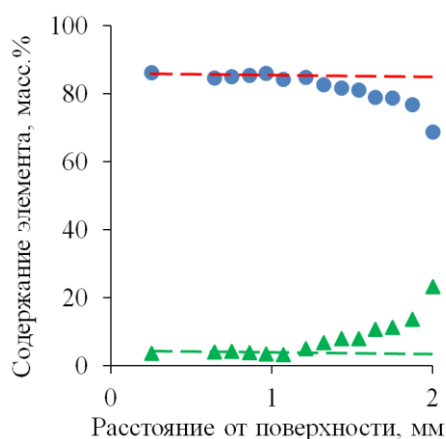


Рис. 2. Распределение элементов по глубине покрытия:

● – никель; ▲ – железо;

пунктир – содержание элементов в исходном порошковом материале

Заметное увеличение содержания железа в результате перемешивания материалов подложки и покрытия наблюдается на расстоянии примерно 0,7 мм от границы раздела подложки и покрытия, т.е. в первом слое наплавки. Во втором и третьем слое содержание железа соответствует исходному порошку. В итоге покрытие получилось однородным по твердости (рис. 3).

Микротвердость является одной из ключевых характеристик механических свойств наплавленного покрытия, от которого зависят его эксплуатационные свойства, в том числе износостойкость. Помимо состава, на величину микротвердости покрытия существенное влияние оказывает его структура, поэтому при лазерной модификации покрытия на режимах 1 и 2 ставилась задача оценить влияние условий кристаллизации сплава на структуру поверхностных слоев. Значения относительной энтальпии $\Delta H/H_s$ для этих режимов, приведенные в табл. 3, меньше единицы, что свидетельствует о

неполном переплавлении покрытия. При этом энергетический вклад в первом случае в 1,3 раза меньше, чем во втором. Анализ микроструктуры показал [6], что при обработке поверхности наплавки по режиму 1 перекристаллизация сплава произошла на небольшую глубину до 200 мкм (10 % от толщины покрытия), тогда как при обработке по режиму 2 глубина перекристаллизации оказалась существенно больше и достигала 600 мкм (30 % от толщины покрытия), что согласуется с бóльшим энерговкладом по сравнению с режимом 1.

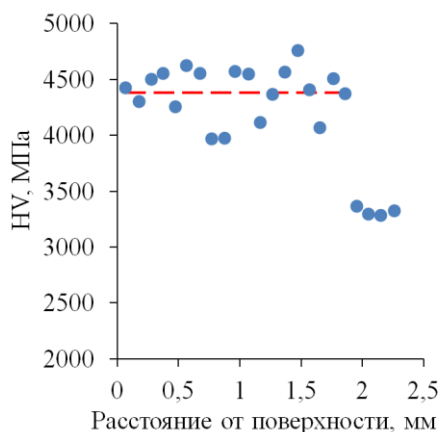


Рис. 3. Изменение микротвердости HV по глубине покрытия:
 ● – локальные значения; пунктир – среднее значение

Покрытие NiCrBSi имеет дендритную структуру [13], поэтому ее количественной характеристикой может служить расстояние между дендритными ветвями. В работах [3, 14] выявлено влияние линейной плотности энергии q_L на расстояние между дендритными ветвями первого порядка. В наших работах для характеристики дендритной структуры никелевой наплавки использовался аналогичный параметр – расстояние между дендритными ветвями второго порядка (дендритный параметр δ) [5, 6]. На рис. 4 показана микроструктура наплавленного покрытия и пример металлографического определения величины дендритного параметра.

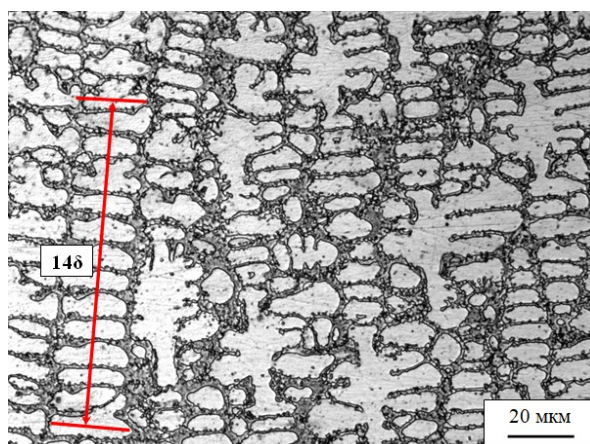


Рис. 4. Микроструктура наплавленного NiCrBSi-покрытия.
 Показанное расстояние между двумя горизонтальными линиями равно 14 дендритным параметрам

Очевидно, дендритный параметр также должен быть связан с величиной энергетического параметра q_L . Для исследуемого покрытия такую связь подтверждает рис. 5, на котором с величиной линейной плотности энергии q_L сопоставлены, помимо дендритного параметра δ , соответствующие значения микротвердости HV.

При повторном плавлении поверхности покрытия по режиму 1 (с меньшим значением q_L) сформировалась более мелкодисперсная структура с меньшей величиной дендритного параметра δ (рис. 5). В результате в соответствии с соотношением Холла – Петча микротвердость покрытия в области повторного плавления повысилась по сравнению с исходным наплавленным металлом. И наоборот, при повторном плавлении поверхности покрытия по режиму 2 (с большим значением q_L) сформировалась более грубая структура с большей величиной дендритного параметра δ и соответственно меньшей микротвердостью.

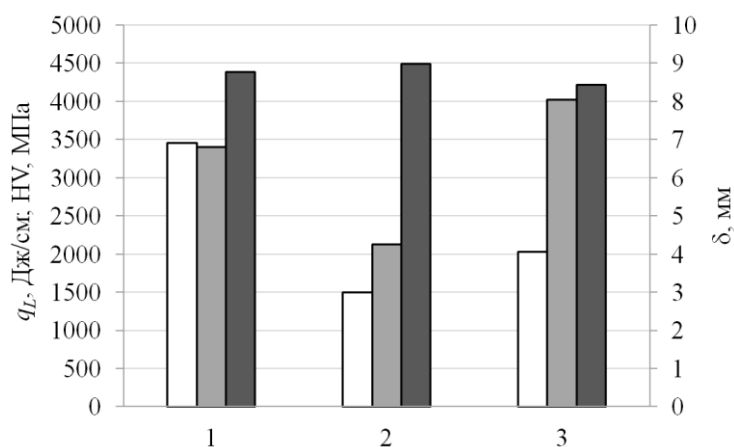


Рис. 5. Влияние линейной плотности энергии q_L на величину дендритного параметра δ и микротвердость покрытия HV: 1 – исходная наплавка; 2 – плавление по режиму 1; 3 – плавление по режиму 2.
□ – q_L ; ■ – δ ; ■ – HV

Таким образом, выбирая величину энергетического параметра q_L при наплавке или лазерной модификации с плавлением поверхности, можно создавать структуру с оптимальной величиной дендритного параметра δ и соответствующими механическими свойствами, в частности микротвердостью и износостойкостью [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере покрытия из сплава системы легирования NiCrBSi на конструкционной стали показана возможность применения энергетического баланса для оценки параметров лазерной наплавки. Для количественной характеристики энерговложения лазерного излучения в наплавляемый материал использованы линейная плотность энергии $q_L = AW/v$, безразмерная энтальпия $\Delta H/H_s$ и размерный параметр $AW/\sqrt{vd_{\text{п}}^3}$. На основании указанных характеристик сделан вывод о том, что процесс наплавки исследованного покрытия происходил в режиме теплопроводности, который обеспечил сплавление исходного порошкового мате-

риала и материала подложки, исключив при этом один из возможных дефектов – значительное перемешивание материалов покрытия и подложки, которое могло понизить механические свойства покрытия. Показана взаимосвязь энергетического параметра q_L со структурой покрытия, где в качестве количественной характеристики структуры использовано расстояние между дендритными ветвями второго порядка (дендритный параметр δ). Изменяя величину энергетического параметра q_L при наплавке или лазерной модификации с плавлением поверхности, можно получить структуру покрытия с оптимальной величиной дендритного параметра δ , который непосредственно влияет на механические свойства покрытия, в частности микротвердость и износостойкость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гольшев А.А., Оришич А.М., Филиппов А.А. Законы подобия лазерной наплавки металлокерамических покрытий // *Прикладная механика и техническая физика*. 2019. Т. 60. № 4. С. 194–205.
2. Маликов А.Г., Гольшев А.А. Лазерное аддитивное выращивание металлокерамических материалов // *Прикладная фотоника*. 2024. Т. 11. № 3. С. 30–49.
3. Promoppatum P., Yao Sh.-Ch., Pistorius P.Ch., Rollett A.D. A Comprehensive Comparison of the Analytical and Numerical Prediction of the Thermal History and Solidification Microstructure of Inconel 718 Products Made by Laser Powder-Bed Fusion // *Engineering*. 2017. V. 3. P. 685–694.
4. Раткевич Г.В. Повышение износостойкости поверхностей трения модифицированием структуры сплавов лазерным излучением: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2021. 137 с.
5. Афанасьева Л.Е., Раткевич Г.В., Новоселова М.В. Роль структурного фактора в повышении износостойкости Ni – Cr – B – Si покрытия после лазерной обработки // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2019. № 9. С. 55–60.
6. Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Измайлов В.В., Барчуков Д.А. Исследование триботехнических свойств поверхностей, полученных воздействием концентрированных потоков энергии: монография. Тверь: ТвГТУ, 2022. 164 с.
7. Metelkova J., Kinds Y., Kempen K., de Formanoir C., Witvrouw A., Van Hooreweder B. On the influence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L // *Additive Manufacturing*. 2018. V. 23. P. 161–169.
8. Колчанов Д.С., Дренин А.А., Денежкин А.О., Шустова Л.А., Сафиуллин С.Р. Особенности процесса селективного лазерного плавления из конструкционной стали 28Х3СНМВФА // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2022. № 10. С. 79–88.
9. Чувильдеев В.Н., Семенычева А.В., Шотин С.В., Грязнов М.Ю. Подходы к определению предельной скорости послойного лазерного сплавления металлов и сплавов // *Физика металлов и металловедение*. 2024. Т. 125. № 9. С. 1070–1082.
10. Li Y., Založnik M., Zollinger J., Dembinski L., Mathieu A. Effects of the powder, laser parameters and surface conditions on the molten pool formation in the selective laser melting of IN718 // *Journal of Materials Processing Technology*. 2021. V. 289. P. 116930.

11. Taghian M., Mazzucato F., Valente A., Saboori A., Iuliano L. Optimizing CoCrNi Single Track Geometry in Directed Energy Deposition: A Regression-Based Approach to Laser Power and Scan Speed Control // *Procedia CIRP*. 2025. V. 134. P. 1035–1040.

12. Afanasieva L.E., Pavlov I.S. Microstructure of the Deposited NiCrBSiC Coating after Laser Polishing // *Letters on Materials*. 2022. V. 12. № 4. P. 287–291.

13. Афанасьева Л.Е. Микроструктура покрытия NiCrBSi после лазерной наплавки и последующего лазерного плавления // *Металлообработка*. 2018. № 3. С. 34–38.

14. Liang Y.J., Li A., Cheng X., Pang X.T., Wang H.M. Prediction of primary dendritic arm spacing during laser rapid directional solidification of single-crystal nickel-base superalloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. V. 688. P. 133–142.

Для цитирования: Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. Взаимосвязь энергетических параметров лазерного плавления и характеристик микроструктуры никелевого сплава // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 3 (31). С. 32–40.

RELATIONSHIP BETWEEN ENERGY PARAMETERS OF LASER MELTING AND MICROSTRUCTURE CHARACTERISTICS OF A NICKEL ALLOY

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., L.E. AFANASIEVA, Cand. Sc.,
M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

The possibility of using energy balance equations to estimate energy consumption during the deposition and modification of a wear-resistant NiCrBSi coating on a steel surface using powder laser cladding is demonstrated. A number of parameters were used to estimate the energy contribution of laser radiation to the workpiece: dimensional and dimensionless enthalpy, energy density, and a complex of process parameters. The influence of energy parameters on the coating microstructure is demonstrated. The secondary dendritic arm spacing (dendritic parameter) serves as a quantitative characteristic of the microstructure. By optimizing the corresponding energy parameters during cladding or laser surface modification based on the dendritic parameter, it is possible to achieve a coating structure that provides the desired mechanical properties, particularly microhardness and wear resistance.

Keywords: laser cladding, energy parameters, energy balance, dendritic parameter.

Поступила в редакцию/received: 20.05.2026; после рецензирования/revised: 29.05.2026;
принята/accepted: 04.06.2026

АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ БАРАБАННОГО ФРЕЗЕРА МТФ-14 С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ

И.В. ГОРЛОВ, д-р техн. наук, И.М.о. ГУЛИЙЕВ, асп.

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

© Горлов И.В., Гулийев И.М.о., 2026

В статье проведен анализ механических и конструктивных параметров привода барабанного фрезера МТФ-14. Рассмотрены конструктивные особенности установки редуктора привода фрез и перспективы использования гидравлического привода при капитальном ремонте агрегата. Приведено сравнение механического и гидравлического приводов с точки зрения возможностей использования типовых узлов при ремонте. Отмечены основные преимущества гидропривода, такие как повышение надежности, увеличение ресурса узлов фрезерного агрегата, улучшение управляемости режимами фрезерования. Установлены основные параметры гидросистемы, необходимые для обеспечения функционирования фрезерного агрегата. Предложены рекомендации по практическому использованию типовых узлов при капитальном ремонте с учетом выбора современных гидромоторов.

Ключевые слова: гидравлический привод, барабанная фреза, торфяная машина, гидросистема, энергоэффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Использование местных энергетических ресурсов позволяет решать проблему повышения безопасности топливно-энергетической системы многих регионов России. В нашем регионе таким ресурсом является торф, запасы которого значительны, а плечо доставки до энергетических объектов короткое. Торфяная индустрия Тверской области требует серьезных вложений для восстановления необходимых объемов добычи, причем решение данной задачи должно опираться на современные подходы в сфере организации эксплуатации техники.

В нашей стране проблема восстановления объемов добычи торфяной промышленности усугубляется нехваткой производственных мощностей в торфяном машиностроении. В связи с резким сокращением объемов добычи торфа в предыдущие годы практически остановилась закупка новой торфяной техники, что привело к остановке большинства российских предприятий торфяного машиностроения. Кроме того, возникла проблема – отсутствие качественных запасных частей для ремонта торфяных машин. Предприятия, осуществлявшие ремонт торфяного оборудования, были вынуждены изготавливать необходимые для восстановления машин детали самостоятельно, обычно в условиях единичного производства, что вело к повышению их стоимости и не всегда обеспечивало требуемое качество. Большинство тофодобывающих предприятий страны функционируют в тяжелых экономических

условиях [1, 2] и не имеют достаточных средств на своевременное обновление технологического оборудования. Вследствие этого кратно увеличиваются затраты на проведение капитальных ремонтов технологических агрегатов, как правило выработавших свой ресурс.

Восстановление отечественной торфяной индустрии с использованием традиционных подходов при эксплуатации торфяных машин в условиях существующей конкуренции с другими направлениями энергетики не сможет обеспечить нужного результата. Следовательно, необходимо внедрять новые решения при ремонте машин, например, основанные на использовании существующих типовых узлов гидроприводов для повышения эффективности восстановления работоспособности торфяного оборудования.

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ТИПОВЫХ ТОРФЯНЫХ МАШИН ДЛЯ ФРЕЗЕРНОГО СПОСОБА ДОБЫЧИ

Добыча фрезерного торфа в настоящее время требует высокой эффективности использования машин, соблюдения экологических норм, а также снижения эксплуатационных затрат, что не всегда обеспечивается при использовании типовых подходов для восстановления работоспособности торфяных машин. Типовые машины в большинстве случаев имеют механический привод технологических агрегатов, чем обусловлено наличие ряда существенных недостатков, к которым относятся:

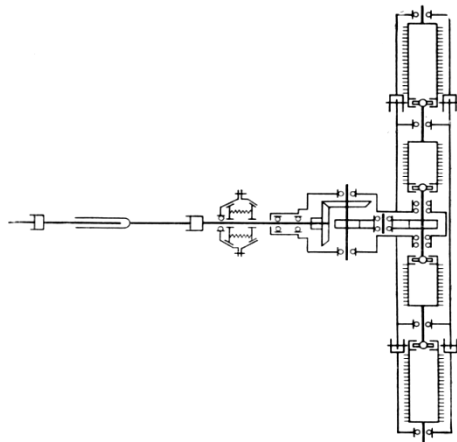
жесткая кинематическая связь элементов трансмиссии, приводящая к повышению динамических нагрузок при взаимодействии с древесными остатками в залежи;

отсутствие возможности широкой регулировки скорости технологических агрегатов;

недостаточная адаптация агрегатов к неоднородности свойств торфяной залежи;

повышенный износ механической передачи фрезерного агрегата при возникновении ударных нагрузок из-за наличия в торфяной залежи древесных включений.

Например, в трансмиссии МТФ-14 и аналогичных фрезерных агрегатов имеется большое количество кинематических узлов (21 подшипник качения, две крестовины, три зубчатые пары, семь кулачковых муфт, предохранительная фрикционная муфта, шлицевое подвижное соединение и др.) (рис. 1).



**Рис. 1. Кинематическая схема фрезера МТФ-14
(показаны только 4 фрезерных барабана)**

Элементы трансмиссии фрезерных агрегатов достаточно часто выходят из строя в период добычи, так как они работают в условиях агрессивной среды, характерной для торфяных месторождений. Кроме того, сказывается значительная изношенность механизмов и отсутствие качественного ремонта. Это значительно уменьшает сезонную производительность технологической машины из-за простоев в неплановых ремонтах и требует дополнительных затрат на восстановление работоспособности. Следовательно, для повышения надежности агрегатов при ремонте лучше использовать такие технические решения, которые позволяют уменьшить число элементов приводов, влияющих на безотказность, и обладают возможностью гибкой адаптации к условиям эксплуатации. Таким решением может стать использование гидравлического привода в технологических агрегатах.

При изучении условий эксплуатации торфяных фрезеров исследователями было установлено [3–6], что при взаимодействии с торфяной залежью создается значительная сила резания (для фрезерного агрегата МТФ-14 касательная составляющая силы резания достигает 6 238 Н с учетом возможного наличия древесных включений размером 0,12 м). Наружный диаметр фрез по вершинам штифтов составляет 0,223 м, при частоте вращения около 750 об/мин требуется мощность привода до 50 кВт, что может быть достаточно легко обеспечено с помощью гидравлического привода.

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ ПРИВОДА ФРЕЗЕРНОГО АГРЕГАТА МТФ-14

Основные модели фрезерных агрегатов построены на основе унифицированных блоков. Конкретные агрегаты в зависимости от модели могут иметь различное число секций рамы, фрез и режущих элементов.

Базовой моделью серии МТФ является прицепной фрезерный агрегат МТФ-14. Он состоит из прицепа, шарнирно соединенных подпружиненных рам, в которых установлены барабанные фрезы, опорных катков, задних катков для регулирования глубины фрезерования и привода. На центральной раме установлен коническо-цилиндрический редуктор (рис. 2), поступающий на который крутящий момент от вала отбора мощности трактора через карданный телескопический вал передается далее на фрезы через сферические муфты (см. рис. 1).

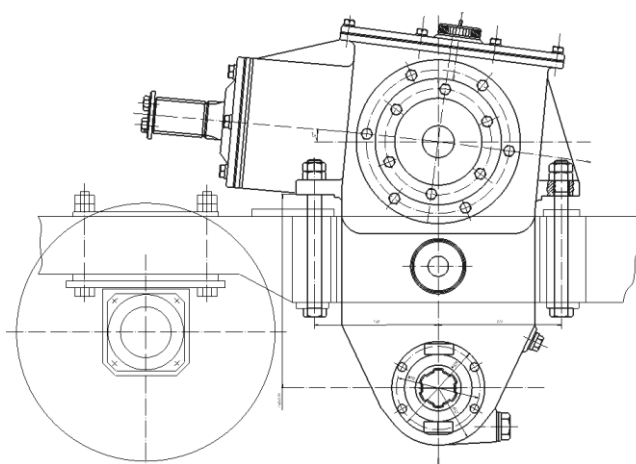


Рис. 2. Схема установки редуктора привода на центральную раму

Сферические муфты устанавливаются на шлицевые поверхности выходного вала редуктора с двух сторон и фиксируются пальцами диаметром 28 мм, на которые крепятся шарнирные втулки (рис. 3).

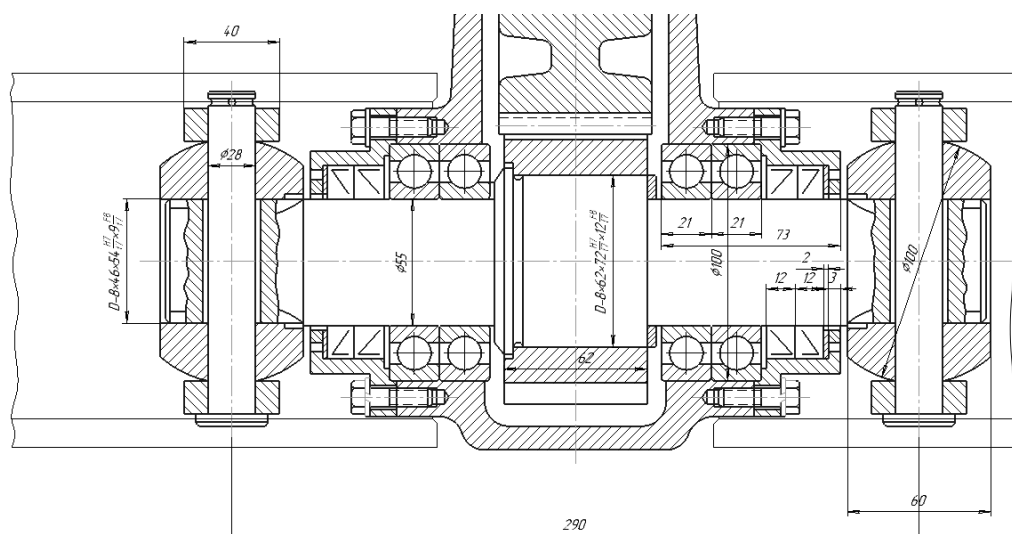


Рис. 3. Конструкция выходного вала редуктора

Корпус редуктора крепится на средней раме четырьмя болтами М12. Крепежные отверстия расположены на раме, расстояние между ними 230×340 мм (рис. 4). При выборе гидромотора необходимо учитывать эти параметры.

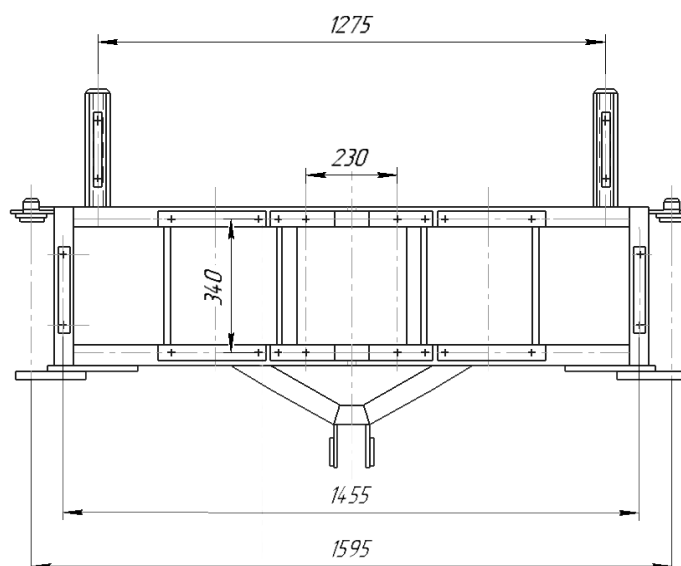


Рис. 4. Конструкция центральной рамы

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОПРИВОДА ДЛЯ ТОРФЯНОГО ФРЕЗЕРА

Для решения проблемы обеспечения надежности оборудования необходимо изменить подход к проведению капитального ремонта торфяных машин, что невозможно осуществить на основе традиционных подходов. Как отмечено выше, множество кинематических элементов трансмиссий торфяных машин наряду с

несовершенством их конструкции приводит к частым отказам в сезон добычи, поэтому для повышения их надежности можно использовать гидравлический привод. Его закрытая от внешней среды конструкция способствует повышению надежности работы в условиях агрессивной среды торфяных месторождений. Кроме того, возможность широкого изменения параметров работы с использованием ограниченного количества типовых устройств регулирования позволяет уменьшить число элементов системы и, как следствие, повысить надежность агрегатов. Упрощается и ремонт привода, поскольку основные элементы гидроприводов производятся серийно, имеют высокое качество и доступны для приобретения.

Новизна применения гидравлического привода для барабанной фрезы торфодобывающей машины заключается не в самой идее использования гидравлики (она давно известна в машиностроении), а в комплексе технических и эксплуатационных преимуществ, которые он обеспечивает именно в специфических условиях торфяных месторождений.

При выборе элементов гидропривода мощность привода насоса должна быть рассчитана с запасом, с учетом потерь энергии. Так, КПД элементов гидросистемы составляет:

гидронасос – $\eta_{\text{насос}} \approx 0,9$;

гидромотор – $\eta_{\text{мотор}} \approx 0,92$;

трубопроводы (гидравлические потери) – $\eta_{\text{трубы}} \approx 0,98$;

регулирующие клапаны – $\eta_{\text{клап}} \approx 0,97$.

Общий КПД системы $\eta_{\text{общ}} = 0,87$.

Требуемая мощность на входе в гидросистему должна быть приблизительно 11,5 кВт, что легко обеспечивается на валу отбора мощности трактора.

Ориентировочное сравнение общих потерь механического и гидравлического приводов показывает, что последний является достаточно эффективным, а в некоторых случаях превосходит механический привод за счет:

плавного регулирования скорости вращения без потерь на пробуксовку;

отсутствия механических передач с низким КПД;

оптимального согласования нагрузки и мощности.

ВЫБОР ГИДРОМОТОРА ДЛЯ ПРИВОДА ФРЕЗЕРНОГО АГРЕГАТА

На выбор конкретного гидромотора влияют следующие факторы [7, 8]:

1. Эксплуатационные параметры, достаточный крутящий момент и возможность регулирования частоты вращения. В нашем случае лучше выбрать гидромотор с прямым приводом на фрезы, без использования редуктора фрезерного агрегата, что существенно упростит конструкцию и повысит ее надежность.

2. Приемлемые габаритные и присоединительные размеры. С точки зрения существующей конструкции фрезерного агрегата выгодно, чтобы при установке гидромотора в процессе капитального ремонта не потребовалось существенного изменения присоединительных параметров, т.е. при установке нужно максимально использовать имеющиеся крепежные поверхности. При этом габариты приводного вала гидромотора должны обеспечить установку типовых или незначительно измененных сферических муфт (см. рис. 3). Важно также, чтобы размер гидромотора соответствовал размеру наружного диаметра корпуса фрезы (170 мм).

3. Плавность и максимальная равномерность вращения без выраженной пульсации. Данное обстоятельство особенно важно при передаче крутящего момента на фрезы, так как контактные поверхности муфт устанавливаются с зазором и пульсация приведет к повышенным динамическим нагрузкам. Кроме того, для обеспечения

требуемых режимов фрезерования необходимы стабильная угловая скорость и точное управление параметрами движения.

Наиболее полно этим требованиям отвечают героторные гидромоторы серии MRB (рис. 5) и им аналогичные. Гидромоторы данной серии имеют двойной выход вала со шпоночным или шлицевым соединением. Гидромоторы имеют максимальный крутящий момент 430 Н · м, частоту вращения от 10 до 800 об/мин, мощность до 35 кВт, что достаточно для фрезера МТФ-11 с шириной захвата 4,8 м (близок по конструкции МТФ-14, но с меньшим количеством фрезерных барабанов).

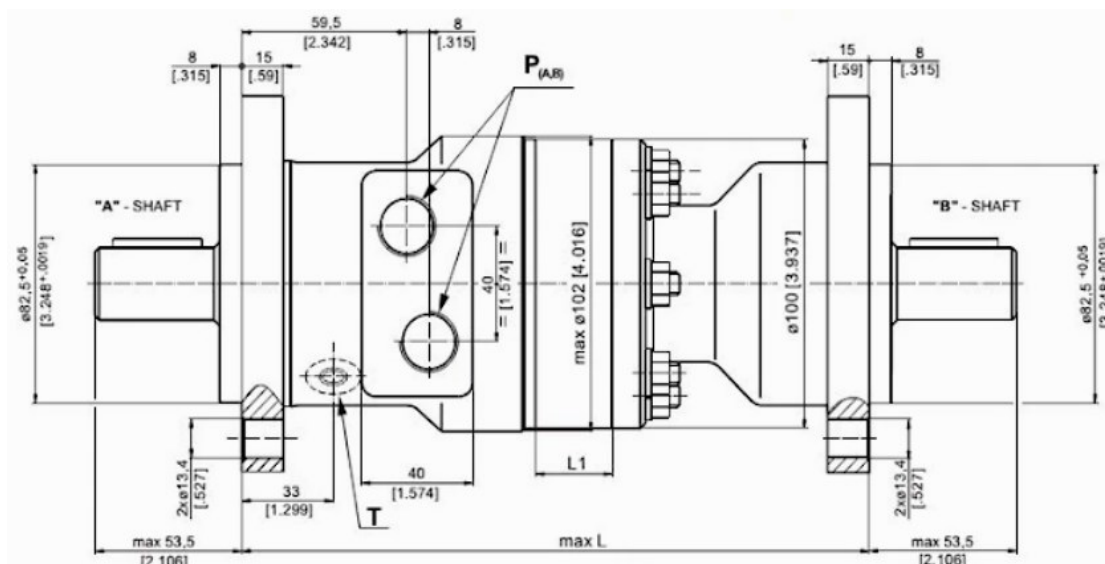


Рис. 5. Героторный гидромотор серии MRB

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение эффективности эксплуатации торфяных машин невозможно без использования новых подходов при восстановлении их работоспособности. Катастрофическое отсутствие качественных запасных частей для торфяных машин требует новых решений при ремонте. Альтернативой типовым решениям является использование гидравлических приводов в капитальном ремонте технологических агрегатов. Гидравлический привод имеет целый ряд преимуществ перед механическим приводом, при этом его элементы производятся серийно, имеют широкую номенклатуру и доступны по цене, что позволяет в случае внезапных отказов производить оперативный ремонт без длительного простоя в ожидании требуемых запасных частей.

Кроме того, гидропривод позволяет гибко регулировать режимы эксплуатации (скорость вращения, крутящий момент, регулируемый режим отключения при перегрузке, работа при кратковременной перегрузке, возможность автоматизации управления режимами эксплуатации и др.).

На основании проведенных исследований установлено:

гидравлический привод обеспечивает плавное регулирование скорости резания (с частотой вращения барабана до 800 об/мин) без редуктора;

система защищает оборудование от перегрузок при встрече с включениями в торфяной залежи (древесные включения, камни [9]);

компактность гидромотора позволяет интегрировать его в существующую конструкцию фрезера;

снижение энергозатрат составляет около 20 %;
использование гидропривода сократит расходы на ремонт;
ресурс режущего инструмента увеличится за счет автоматических регулировок;
снижается уровень вибрации и шума;
возможна автоматизация управления;
гидросистема стабильно работает в допустимом температурном диапазоне.

Таким образом, гидравлический привод позволяет существенно повысить надежность торфяных машин для фрезерного способа добычи, а использование типовых элементов гидропривода при ремонте обеспечит снижение затрат на восстановление работоспособности и, как следствие, повысит эффективность торфяного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов А.В., Иванов С.Л., Габов В.В. Формирование и эффективное использование машинного парка торфодобывающих компаний // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2015. № 14. С. 82–91.
2. Хазанович Г.Ш., Черных В.Г., Воронова Э.Ю., Отроков А.В. О некоторых направлениях разработки эффективного горнопроходческого оборудования // *Горное оборудование и электромеханика*. 2013. № 4. С. 20–24.
3. Фомин К.В., Рахутин М.Г. Моделирование повреждающих воздействий на режущих элементах рабочего органа фрезерующего агрегата при взаимодействии с торфом // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № S39. С. 36–46.
4. Фомин К.В. Методика оценки спектральной плотности момента сопротивления на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата // *Записки Горного института*. 2020. Т. 241. С. 58–67.
5. Яблонев А.Л., Жуков Н.М. Расчет момента сопротивления фрезерованию торфяной залежи при попадании фрезы на пень и определение активной ширины рабочего органа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 2 (10). С. 51–61.
6. Фомин К.В. Моделирование нагрузок на рабочем органе торфяного фрезерующего агрегата с учетом погрешности расстановки режущих элементов // *Горные науки и технологии*. 2022. Т. 7. № 2. С. 161–169.
7. Копенкина Л.В. Проектирование торфяных машин (к 100-летию ТвГТУ и кафедры технологических машин и оборудования) // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 2 (14). С. 91–99.
8. Яблонев А.Л. Гидропривод горных, транспортных и технологических машин: расчет и лабораторный практикум: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2024. 112 с.
9. Горлов И.В., Рахутин М.Г. Влияние пнистости залежи на безотказность торфяных машин // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2017. № 12. С. 139–145.

Для цитирования: Горлов И.В., Гулийев И.М.о. Анализ механических и конструктивных параметров барабанного фрезера МТФ-14 с точки зрения использования гидравлического привода при капитальном ремонте // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 3 (31). С. 41–48.

ANALYSIS OF MECHANICAL AND DESIGN PARAMETERS OF THE MTF-14 DRUM MILLING CUTTER FROM THE POINT OF VIEW OF THE USE OF A HYDRAULIC DRIVE DURING MAJOR REPAIRS

I.V. GORLOV, Dr. Sc., I.M.o. GULIJEV, Postgraduate

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

This article analyzes the mechanical and design parameters of the MTF-14 drum milling machine drive. It examines the design features of the milling machine drive gearbox and the potential for using a hydraulic drive during overhauls. A comparison of mechanical and hydraulic drives is provided in terms of the potential for using standard components during repairs. The key advantages of a hydraulic drive are described: increased reliability, increased service life of milling machine components, and improved controllability of milling modes. The key hydraulic system parameters required to ensure the operation of the milling machine are established. Recommendations for the practical use of standard components during overhauls are provided, taking into account the selection of modern hydraulic motors.

Keywords: hydraulic drive, drum milling machine, peat machine, hydraulic system, energy efficiency.

Поступила в редакцию/received: 31.03.2026; после рецензирования/revised: 06.04.2026;
принята/accepted: 17.04.2026

УДК 622.331:639.3

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-48-57

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОТОЧНОГО КАНАЛА ДЛЯ ИНКУБАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ, УСТАНОВЛИВАЕМОЙ НА ОТРАБОТАННЫХ ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук, А.А. АНДРИАНОВА, ст. препод.

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: lp62007@yandex.ru

© Яблонев А.Л., Андрианова А.А., 2026

Размещение в проточном канале отработанного торфяного месторождения инкубационной системы требует гидравлического расчета как самой системы, так и канала. Расчет элементов инкубационной системы (гнезда-инкубатора и подводных гофрированных ПВХ-труб) был ранее уже представлен в ряде статей. В данной статье описана разработанная авторами методика расчета проточного канала и определены его основные параметры: гидравлический уклон дна, скорость течения потока и расход воды. Приведен пример расчета канала по предложенной методике. Отмечено, что рациональный внутренний диаметр гофрированной ПВХ-трубы составляет 25 мм, а требуемый уклон для инкубирования икры пеляди – 0,000 66...0,000 79. Рекомендована техника для рытья и ремонта проточного канала, приведена ее краткая характеристика.

Ключевые слова: оработанное торфяное месторождение, гофрированная ПВХ-труба, инкубационная система, гнездо-инкубатор, проточный канал, коэффициент Шези, расход, гидравлический уклон.

ВВЕДЕНИЕ

Основные технологии извлечения торфа из недр Земли предполагают проведение после отработки месторождения комплекса рекультивационных мероприятий [1, 2], наиболее перспективным и эффективным среди которых является организация прудов с последующим их зарыблением [3, 4]. Зарыбление может производиться путем искусственного инкубирования мальков рыб в естественных условиях. Для этого используются инкубационные системы с гнездом-инкубатором типа «шайба», устанавливаемые в проточный канал (рис. 1). В качестве ценной породы рыб нами предлагается пелядь.

Основные элементы системы – гнездо-инкубатор, подводящая гофрированная ПВХ-труба, водозаборное устройство. Движение воды и гидравлический расчет гнезда-инкубатора и подводящей трубы были рассмотрены в работах [5, 6], однако для обеспечения нормальной работы системы следует рассмотреть вопрос об уклоне дна и других параметрах проточного канала на месте оработанного торфяного месторождения. Этому и посвящена данная статья.



Рис. 1. Оборудование инкубационной системы перед установкой

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Схема наиболее эффективной инкубационной системы с выносным водозаборным устройством (см. рис. 1) представлена на рис. 2.

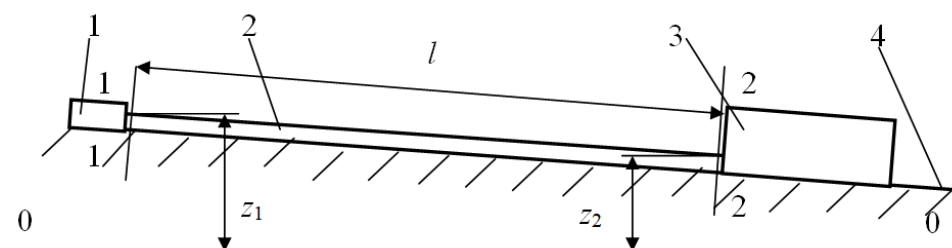


Рис. 2. Схема инкубационной системы: 1 – водозаборное устройство; 2 – подводящая гофрированная ПВХ-труба; 3 – гнездо-инкубатор; 4 – поверхность дна канала

Исходными данными для разработки методики расчета являются:

диаметр икринок $d_{\text{и}} = 1,6 \dots 2,5$ мм [6, 7];

диаметр лунки-ячейки гнезда инкубатора $D = 6$ мм;

количество лунок в гнезде-инкубаторе $N = 200$ шт.;

диаметр подводящей гофрированной ПВХ-трубы $d_{\text{тр}} = 16, 20, 25$ мм;

длина подводящей гофрированной ПВХ-трубы $l = 3$ м;

скорость витания икринок в гнезде-инкубаторе $v_{\text{теор}} = 1,096 \cdot 10^{-2} \dots 1,37 \cdot 10^{-2}$ м/с.

Площадь живого сечения обтекания икринки в гнезде-инкубаторе, м^2 :

$$S = \frac{\pi(D^2 - d_{\text{и}}^2)}{4}. \quad (1)$$

Расход воды, проходящей через гнездо-инкубатор, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$Q = v_{\text{теор}} S N. \quad (2)$$

Площадь живого сечения подводящей гофрированной ПВХ-трубы, м^2 :

$$S_{\text{т}} = \frac{\pi d_{\text{тр}}^2}{4}. \quad (3)$$

Средняя скорость течения воды в подводящей гофрированной ПВХ-трубе, м/с:

$$v_{\text{т}} = \frac{Q}{S_{\text{т}}}. \quad (4)$$

Результаты промежуточных расчетов параметров потока воды в гофрированных ПВХ-трубах по формулам (1)–(4) представлены в табл. 1.

Таблица 1. Расчет параметров потока воды в гофрированных ПВХ-трубах

Параметр	$S \cdot 10^5, \text{м}^2$	$Q \cdot 10^5, \text{м}^3/\text{с}$	$S_{\text{т}} \cdot 10^4, \text{м}^2$			$v_{\text{т}} \cdot 10^2 \text{ м/с}$		
			$d_{\text{тр}} = 16 \text{ мм}$	$d_{\text{тр}} = 20 \text{ мм}$	$d_{\text{тр}} = 25 \text{ мм}$	$d_{\text{тр}} = 16 \text{ мм}$	$d_{\text{тр}} = 20 \text{ мм}$	$d_{\text{тр}} = 25 \text{ мм}$
$d_{\text{и}} = 1,6 \text{ мм}$	2,625	5,754	2,096	3,14	4,906	27,452	18,325	11,728
$d_{\text{и}} = 2,5 \text{ мм}$	2,335	6,399				30,528	20,378	13,042

Составим уравнение Д. Бернулли для сечений 1-1 и 2-2 на рис. 2 [8]:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}}, \quad (5)$$

где z_1 и z_2 – геометрические высоты центров тяжести сечений 1-1 и 2-2; P_1 и P_2 – давление жидкости в сечениях; ρ – плотность жидкости; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; α_1 и α_2 – коэффициенты Кориолиса (коррективы кинетической энергии) для сечений; v_1 и v_2 – средние скорости жидкости в сечениях; $h_{w_{1-2}}$ – потери гидродинамического напора между сечениями 1-1 и 2-2.

Перенесем правую часть влево и приравняем к нулю:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} - z_2 - \frac{P_2}{\rho g} - \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} - h_{w_{1-2}} = 0. \quad (6)$$

Поскольку диаметры ПВХ-трубы в сечениях одинаковы, то одинаковы и давления и скорости, а также коэффициенты Кориолиса: $P_1 = P_2$, $v_1 = v_2$, $\alpha_1 = \alpha_2$. Следовательно,

$$z_1 - z_2 = h_{w_{1-2}}, \quad (7)$$

т.е. разница в геометрических напорах расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений. Сопротивление между сечениями 1-1 и 2-2 всего одно – по длине. Найдено оно может быть по формуле Дарси – Вейсбаха [8]:

$$h_{w_{1-2}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v_T^2}{2g}, \quad (8)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения; l – длина подводящей ПВХ-трубы; d – внутренний диаметр подводящей ПВХ-трубы; v_T – ранее рассчитанная теоретическая средняя скорость жидкости в трубе.

Разница геометрических напоров, отнесенная к длине ПВХ-трубы, есть гидравлический уклон дна проточного канала [8]:

$$\frac{z_1 - z_2}{l} = i. \quad (9)$$

Коэффициенты гидравлического трения для ПВХ-труб внутренним диаметром 16, 20 и 25 мм могут быть найдены по формулам [5]:

$$\lambda_{16} = 0,4013 v_T^{-0,235}, \quad (10)$$

$$\lambda_{20} = 0,0888 v_T^{-0,251}, \quad (11)$$

$$\lambda_{25} = 0,0792 v_T^{-0,487}, \quad (12)$$

причем скорость измеряется в данных эмпирических формулах в сантиметрах за секунду (см/с).

Все расчеты λ , $h_{w_{1-2}}$, i по формулам (8)–(12) сведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчет гидравлического уклона дна проточного канала

Параметр	$\lambda \cdot 10^2$			$h_{w_{1-2}} \cdot 10^2, \text{ м}$			i		
	$d_{\text{тр}} = 16 \text{ мм}$	$d_{\text{тр}} = 20 \text{ мм}$	$d_{\text{тр}} = 25 \text{ мм}$	$d_{\text{тр}} = 16 \text{ мм}$	$d_{\text{тр}} = 20 \text{ мм}$	$d_{\text{тр}} = 25 \text{ мм}$	$d_{\text{тр}} = 16 \text{ мм}$	$d_{\text{тр}} = 20 \text{ мм}$	$d_{\text{тр}} = 25 \text{ мм}$
$d_{\text{н}} = 1,6 \text{ мм}$	18,425	4,279	2,388	13,270	1,099	0,201	0,044 2	0,003 6	0,000 66
$d_{\text{н}} = 2,5 \text{ мм}$	17,971	4,167	2,268	16,005	1,323	0,235	0,053 4	0,004 4	0,000 79

Как показывает анализ полученных данных, при использовании ПВХ-трубы диаметром 16 мм потери напора слишком велики, а разница геометрических напоров (перепад высот) на длине 3 м должна составлять 13...16 см, что невозможно реализовать на практике. Максимальный уклон, согласно нормам технологического проектирования для торфяных предприятий, назначается с учетом допускаемых неразрывающих скоростей течения воды. Так, разрешается без расчета принимать уклоны по магистральным и валовым каналам до 0,001 (перепад высот 1 см на 10 м длины канала). На небольших участках каналов длиной до 100 м допускаются уклоны до 0,002...0,003 [9]. Таким образом, полностью удовлетворяет последней рекомендации только ПВХ-труба диаметром 25 мм, которую и следует использовать в инкубационной системе. Все последующие расчеты учитывают именно ее применение.

Определим среднюю скорость движения воды и ее расход в проточном канале.

Коэффициент Шези определяется по формуле Н.Н. Павловского [10]:

$$c = \frac{1}{n} R^y, \quad (13)$$

где n – коэффициент шероховатости, зависящий от материала и состояния русла водотока, принимаемый по табл. 3; R – гидравлический радиус сечения канала, равный отношению площади живого сечения к смоченному периметру; y – показатель степени, который приближенно можно определить по формулам:

для $R < 1$ м

$$y = 1,5\sqrt{n}; \quad (14)$$

для $R > 1$ м

$$y = 1,3\sqrt{n}. \quad (15)$$

Таблица 3. Значения коэффициентов шероховатости стенок водотока [10]

Род стенок, или характеристика русла	n
Большие каналы в минеральном и торфяном грунте в средних условиях содержания и ремонта и малые каналы в хороших условиях; реки и ручьи в благоприятных условиях (со свободным течением, без засорения и значительного количества водорослей)	0,025
Каналы в минеральном и торфяном грунте: большие – в условиях ниже средних, малые – в средних условиях	0,027 5
Каналы в минеральном и торфяном грунте и реки в сравнительно плохих условиях (например, с водорослями и булыжником или заметно заросшие травой с местными обвалами откосов и т.п.)	0,03
Каналы и реки в минеральном и торфяном грунте, находящиеся в весьма плохих условиях, с неправильным профилем, значительно засоренные камнями и водорослями и пр.	0,035

Коэффициент шероховатости изменяется от 0,025 до 0,035 со средним значением 0,03 (см. табл. 3).

Для определения гидравлического радиуса проточного канала необходимо задаться его размерами, а последние вытекают из характеристики машины, которая его

формирует. Это, например, шнековый каналокопатель КШ-1,3К производства ООО «Гринмаш» [11] или его финский аналог Suokone OJ-1,3K (рис. 3).

Данный каналокопатель предназначен для рытья и прочистки каналов, имеет массу $m = 1\,750$ кг, является навесной машиной на колесный трактор мощностью $N = 110 \dots 150$ кВт, позволяет формировать канал глубиной $h = 1,3$ м; шириной поверху $a = 1,28$ м; шириной понизу $b = 0,34$ м.

Еще один способ рытья каналов осуществляется с помощью одноковшового экскаватора с профильным трапецидальным ковшом (рис. 4), однако качество таких каналов (в том числе ровность) невысоко и производительность работ крайне низкая. К этому следует добавить невозможность получения постоянного фиксированного уклона.



Рис. 3. Шнековый канавокопатель КШ-1,3К [11]

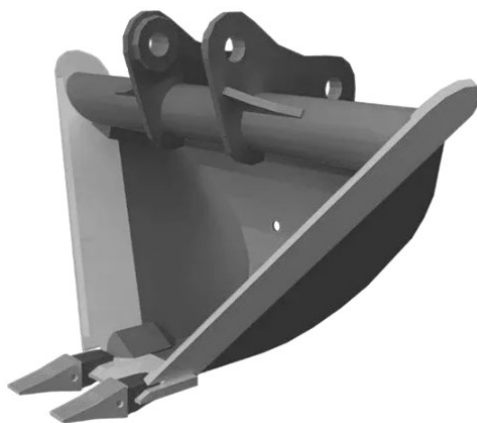


Рис. 4. Профильный трапецидальный ковш для одноковшового экскаватора [12]

Для определения смоченного периметра и гидравлического радиуса необходимо задаться глубиной наполнения канала. В исследованиях [13, 14] рекомендуемая глубина наполнения канала составляет $h_k = 0,5 \dots 0,8$ м со средним значением $0,65$ м (рис. 5). Данная величина обосновывается, с одной стороны, необходимостью беспрепятственного комфортного выхода мальков и мерами против браконьерства, а с другой – возможностью обслуживания системы.

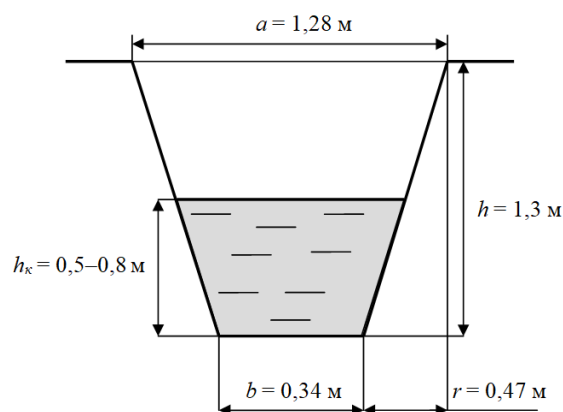


Рис. 5. Размеры и профиль проточного канала

Согласно рис. 5, технологический коэффициент заложения откосов

$$m = \frac{r}{h}. \quad (16)$$

Для данного канала $m = \frac{0,47}{1,3} = 0,362$.

Смоченный периметр [10]:

$$\chi = b + 2h_k\sqrt{1 + m^2}. \quad (17)$$

Площадь живого сечения канала [10]:

$$\omega = (b + mh_k)h_k. \quad (18)$$

Гидравлический радиус канала

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (19)$$

После расчета параметров канала по формулам (16)–(19) можно найти показатель степени y по зависимостям (14) или (15) и определить коэффициент Шези по формуле (13).

Средняя скорость течения воды в проточном канале

$$v_k = c\sqrt{Ri}, \quad (20)$$

расход воды в проточном канале

$$Q_k = \omega v_k. \quad (21)$$

Все расчетные параметры проточного канала сведены в табл. 4 (для удобства размерность расхода воды в канале переведена из кубических метров за секунду ($\text{м}^3/\text{с}$) в литры за минуту ($\text{л}/\text{мин}$)).

Таблица 4. Расчет параметров проточного канала

Параметр	χ , м	ω , м ²	R , м	y	c	v_k , м/с	Q_k , м ³ /с	Q_k , л/мин
$d_n = 1,6$ мм	1,723	0,374	0,217	0,260	22,408	0,270	0,101	6 061,602
$d_n = 2,5$ мм						0,293	0,109	6 568,690

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты исследования позволили сформировать методику расчета параметров проточного канала для инкубационной системы, устанавливаемой на отработанном торфяном месторождении (рис. 6). В качестве примера приведен расчет параметров канала, представленного на рис. 4.

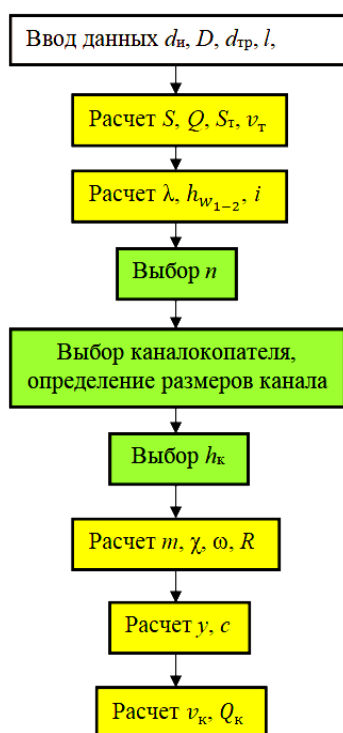


Рис. 6. Блок-схема методики расчета параметров проточного канала для инкубационной системы, устанавливаемой на отработанном торфяном месторождении

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги вышеизложенного, можно сделать следующие выводы.

1. В инкубационной системе обосновано применение гофрированной ПВХ-трубы внутренним диаметром 25 мм.
2. Предложен выбор техники, формирующей проточный канал.
3. Установлено, что для обеспечения функционирования инкубационной системы дно проточного канала должно иметь уклон $i = 0,000\ 66 \dots 0,000\ 79$.
4. Разработана методика расчета параметров проточного канала для инкубационной системы, устанавливаемой на отработанном торфяном месторождении.
5. Представлен пример расчета проточного канала на отработанном торфяном месторождении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Misnikov O. Basic technologies and equipment used for peat deposits development in foreign countries // *E3S Web of Conferences. EDP Sciences*. 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. Андрианова А.А., Яблонев А.Л. Комплексное использование карьеров отработанных торфяных месторождений // *Современные технологии и инновации: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции*. Тверь: ТвГТУ, 2025. С. 61–65.
4. Андрианова А.А., Яблонев А.Л. Обзор методов комплексного использования выработанных месторождений торфа в сравнении с другими горными породами, добываемыми открытым способом // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 26–40.
5. Андрианова А.А., Яблонев А.Л. Гидравлическое обоснование параметров инкубационной системы, устанавливаемой на отработанных торфяных месторождениях // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026 № 1 (29). С. 67–77.
6. Яблонев А.Л., Андрианова А.А. Обоснование скорости витания икринок в инкубационной системе, устанавливаемой на отработанных торфяных месторождениях // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 2 (30). С. 86–93.
7. Львов Ю.Б. Совершенствование технологии воспроизводства пеляди: дис. ... канд. с/х наук. Москва, 2020. 113 с.
8. Вильнер Я.М., Ковалев Я.Т., Некрасов Б.Б. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. Минск: Вышэйшая школа, 1976. 416 с.
9. Смирнов В.И., Васильев А.Н., Афанасьев А.Е., Болтушкин А.Н. Практическое руководство по организации добычи фрезерного торфа. Тверь: ТГТУ, 2007. 392 с.
10. Справочник по торфу / под ред. А.В. Лазарева и С.С. Корчунова. М.: Недра, 1982. 760 с.
11. Шнековый канавокопатель КШ-1,3К. URL: <http://greenmash.ru/equipment-for-peat-extraction/shnekovyy-kanavokopatel-oj-1-3-k-sovmestno/> (дата обращения: 25.01.2026).
12. Ковш профильный на экскаватор-погрузчик. URL: [https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fnaftatech.com%2Fassets%2Ftemplates%2Fnafta%2Fasset%2Fimg%2FFoto\(new\)%2FKovshi%2Fkovsh_profil_nyj_01.jpg&lr=14&pos=0&rpt=simage&source=serp&text=ковши%20для%20экскаватора](https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fnaftatech.com%2Fassets%2Ftemplates%2Fnafta%2Fasset%2Fimg%2FFoto(new)%2FKovshi%2Fkovsh_profil_nyj_01.jpg&lr=14&pos=0&rpt=simage&source=serp&text=ковши%20для%20экскаватора) (дата обращения: 28.01.2026).
13. Скоробогатов М.А., Андрианова А.А., Павлов Д.С., Веселов А.Е., Ефремов Д.А., Ручьев М.А. Гидравлические расчеты гнезд-инкубаторов для икры лососевых рыб с выносным водозаборным устройством // *Природообустройство*. 2020. № 1. С. 104–110.
14. Скоробогатов М.А., Павлов Д.С., Веселов А.Е., Ефремов Д.А., Ручьев М.А., Фомина А.А. Гидравлические исследования гнезд-инкубаторов икры лососевых рыб, устанавливаемых в речных условиях // *Рыбное хозяйство*. 2016. № 4. С. 67–70.

Для цитирования: Яблонев А.Л., Андрианова А.А. Методика расчета параметров проточного канала для инкубационной системы, устанавливаемой на отработанных торфяных месторождениях // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 3 (31). С. 48–57.

A METHOD FOR CALCULATING FLOW-CHANNEL PARAMETERS FOR AN INCUBATOR SYSTEM INSTALLED AT DEPLETED PEAT DEPOSITS

A.L. YABLONEV, Dr. Sc., A.A. ANDRIANOVA, Senior Lecturer

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: lp62007@yandex.ru

Placing an incubation system in a flow channel of a depleted peat deposit requires hydraulic calculations for both the system itself and the channel. Calculations for the incubation system components (the incubator nest and the supply corrugated PVC pipes) have been previously presented in several articles. This paper describes the authors' developed method for calculating a flow channel and identifying its key parameters – the hydraulic slope of the bottom, the water flow velocity, and the flow rate. An example of a channel calculation using the proposed method is provided. It is noted that a reasonable internal diameter of a corrugated PVC pipe is 25 mm, and the required slope for incubating peled eggs is 0.000 66...0.000 79. Equipment for digging and repairing the flow channel is recommended, and its brief technical specifications are provided.

Keywords: depleted peat deposit, corrugated PVC pipe, incubation system, incubator nest, flow channel, Chezy coefficient, flow rate, hydraulic slope.

Поступила в редакцию/received: 31.03.2026; после рецензирования/revised: 06.04.2026;
принята/accepted: 17.04.2026

УДК 622.331:622.271

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-57-65

ОЦЕНКА ВОДНО-ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КУСКОВОГО ТОРФА С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИДРОФОБИЗАЦИИ ТОРФОМАССЫ ПЕРЕД ФОРМОВАНИЕМ

A.B. КУПОРОВА, канд. техн. наук

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

© Купорова А.В., 2026

В статье рассмотрены вопросы о положительном влиянии гидрофобизации торфяной массы перед формованием на водно-технические свойства кускового торфа. Приведены результаты исследований по определению водопоглотительной и водоотталкивающей способностей образцов кускового торфа. Установлено, что применение гидрофобных добавок при производстве кускового торфа улучшает качественные характеристики исходного торфяного сырья, положительно влияет на водно-физические характеристики готовой продукции, позволяет сократить зависимость технологии производства от метеорологических условий региона добычи, а также свести к нулевым значениям удлинение сушки за счет влагообмена с залежью. Использование гидрофобных добавок обеспечивает снижение начальной влажности кусков торфа при формовании, а следовательно, сокращение энергетических затрат на производство.

Ключевые слова: кусковой торф, добыча, полевая сушка, гидрофобная добавка, технология, водопоглощение, водоотталкивающая способность.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время добыча кускового торфа осуществляется двумя основными способами – фрезформовочным и экскаваторным, которые реализуются в полевых условиях с естественной сушкой с использованием солнечной энергии [1]. Искусственная сушка применяется только в заводских условиях при производстве формованного твердого топлива более высокого качества. К такому топливу относятся полубрикеты, брикеты (рис. 1), термобрикеты и пеллеты, получаемые под высоким давлением в брикетных или пеллетных прессах [2]. В качестве сырья в таких технологиях используется фрезерный торф с влажностью ~35...45 %, который в специальных сушильных установках высушивается до влажности 10...16 %.



Рис. 1. Торфяные брикеты различных производителей

Данный вид формованного твердого топлива обладает рядом достоинств. По сравнению с производством кускового топливного торфа производство топливных торфяных брикетов минимально зависит от погодных условий, благодаря чему выпуск продукции можно осуществлять круглый год. Полученные изделия обладают повышенной прочностью и плотностью, что позволяет значительно снижать транспортные расходы. Торфяные брикеты имеют более удобную форму и размер для сжигания в топочных устройствах колосникового типа. Однако все эти достоинства практически сводятся на нет одним серьезным недостатком: брикетированное в заводских условиях твердое топливо требует больших затрат энергии на искусственную сушку и формование [3, 4].

В связи с этим кусковой торф, при условии снижения зависимости производства от погодных факторов, может составить серьезную конкуренцию брикетированному топливу и удовлетворять потребности регионов в местном топливе. Гидрофобизация торфомассы, в свою очередь, будет вносить изменение в процесс структурообразования при сушке формованного кускового торфа [5, 6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Водопоглощаемость – это способность материала поглощать и удерживать влагу. Водопоглощаемость кускового торфа зависит от многих факторов, основными из которых являются степень разложения, зольность и дисперсность торфомассы. В технологии добычи кускового торфа необходимо стремиться к предельно возможному

снижению этой величины. Для регулирования и прогнозирования поглощения влаги торфом нужно знать физические закономерности данного процесса [3, 7].

Водопоглощаемость зависит как от самого типа и вида торфа, так и от внутри- и межагрегатных связей в его структуре. Например, известно [7], что при одинаковом начальном влагосодержании и равной степени разложения низинный тип торфа поглощает влагу в меньшем количестве и набухает медленнее, чем верховой. В процессе впитывания влаги торф увеличивается в размере за счет набухания отдельных компонентов его твердого (в основном органического) вещества. На практике принято определять величину водопоглощения торфа при нахождении его в воде (при полном погружении) в течение 48 часов, поскольку считается, что к этому времени процесс водопоглощения практически заканчивается (хотя в действительности поглощение влаги может происходить в течение и более длительного промежутка времени).

В экспериментах по определению водопоглощения торфа предварительно взвешенные образцы с определенной влажностью помещались в сетчатые мешочки, изготовленные из полимерного материала, а затем в пластиковые емкости с дистиллированной водой. Исследования проводились при температуре 22 ± 3 °С с таким расчетом, что величина водопоглощения зависела только от физико-химических свойств образцов и времени [3, 8, 9].

По истечении определенного промежутка времени образцы доставали из емкостей и после гравитационного удаления из них свободно стекающей влаги взвешиванием определяли количество впитанной воды. Замеры массы образцов производились через 30 минут, 1, 3, 5, 24 и 48 часов от начала опыта. Принятые временные интервалы позволяли определить характерные фазы впитывания (рис. 2).



Рис. 2. Эксперимент по исследованию водопоглощительных свойств гидрофобно-модифицированного кускового торфа

Определение величины водопоглощения представляет особый интерес для оценки свойств кусковой продукции при натуральной влажности. Величина водопоглощения сразу показывает то количество воды, которое может поглотиться торфом. Установлено, что чем больше начальная влажность торфяной продукции, тем меньше она поглощает воды [3, 10].

При определении водоотталкивающих свойств гидрофобно-модифицированного формованного кускового торфа на поверхность кусков наносились капли воды (рис. 3) и засекали секундомером время полного впитывания каждой капли. После их сушки до равновесного влагосодержания замеряли время впитывания капли контрольными образцами (без добавок) и образцами с добавками, концентрация которых составляла

0,5...4 масс. % (с шагом 0,5 %). Максимальное время впитывания $t_{\max \text{ вп}}$ рассчитывали как среднее арифметическое по десяти измерениям кусков с концентрацией гидрофобизатора 4 % (по соображениям экономической эффективности).

Было установлено, что пленки гидрофобизатора достаточно надежно и стабильно изолируют гидрофобную пористую структуру торфа от проникновения капельножидкой влаги, начиная с концентрации добавки 2 %. При дальнейшем повышении концентрации гидрофобность практически не изменялась.



Рис. 3. Эксперимент по определению водоотталкивающих свойств гидрофобно-модифицированного кускового торфа

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные эксперименты позволили сделать вывод о положительном влиянии гидрофобизации на водно-технические свойства кускового торфа [3, 11], а также на технологические показатели производства кускового гидрофобно-модифицированного торфа [12].

Количество поглощенной торфом воды в технологии его добычи характеризуется коэффициентом поглощения осадков $K_{ос}$. Теоретически его определение достаточно проблематично, поэтому для конкретных условий он определяется эмпирически, а для технологических расчетов принимается по справочным данным для конкретной области, которые в свою очередь составляются по средним многолетним метеорологическим наблюдениям [13]. При обработке данных, полученных экспериментальным путем, для оценки влияния гидрофобно-модифицирующих добавок на $K_{ос}$ вводили поправочный коэффициент, определяемый по времени смачиваемости поверхности каплями воды. Анализ водоотталкивающих свойств формованного торфа осуществляли по результатам экспериментов по смачиванию поверхности гидрофобно-модифицированного торфа с различными концентрациями добавок и контрольного образца.

Анализ экспериментальных данных по капельному смачиванию поверхности торфяных кусков показывает незначительное увеличение времени впитывания влаги в случае с пушицево-сфагновым торфом по причине положительного влияния на смачиваемость механизма образования гидрофильных гуматов натрия. При этом повышение концентрации гидрофобизатора не приводит к усилению гидрофобного эффекта. Вероятнее всего, это связано с тем, что даже минимальная концентрация позволяет сформировать водоотталкивающее покрытие на пористой структуре торфа. В магелланикум-торфе гидрофобный эффект от применения гидрофобной добавки ГКЖ-11 выражен еще слабее (таблица).

Результаты исследования водоотталкивающих свойств
экспериментальных образцов, модифицированных добавкой ГКЖ-11

Вид торфа	Время полного впитывания капли воды, мин, в зависимости от концентрации добавки, %			
	0	1	2	3
Пушицево-сфагновый, $R_T = 30\%$	115	154	133	142
Магелланикум, $R_T = 5...10\%$	181	189	203	191

Примечание. R_T – степень разложения торфа.

Совершенно другая картина наблюдается при использовании водонерастворимого ГКЖ-94 (рис. 4, 5).

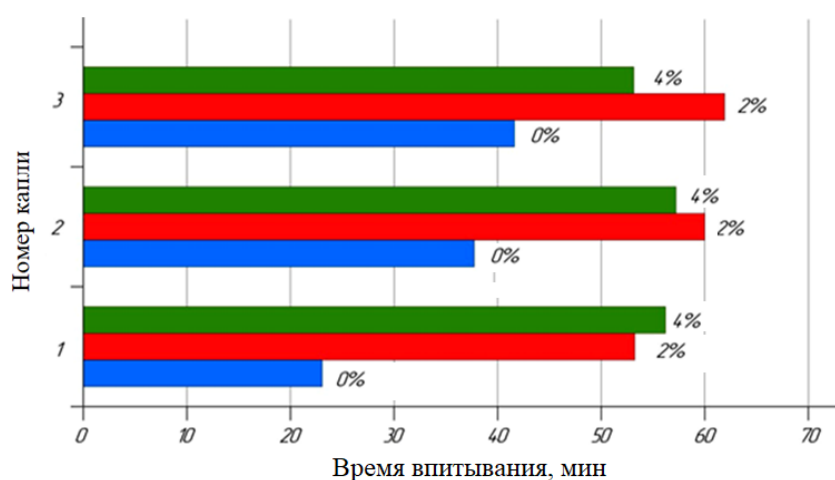


Рис. 4. Зависимость времени впитывания влаги образцами (переходный торф, $R_T = 35\%$) от концентрации добавки ГКЖ-94

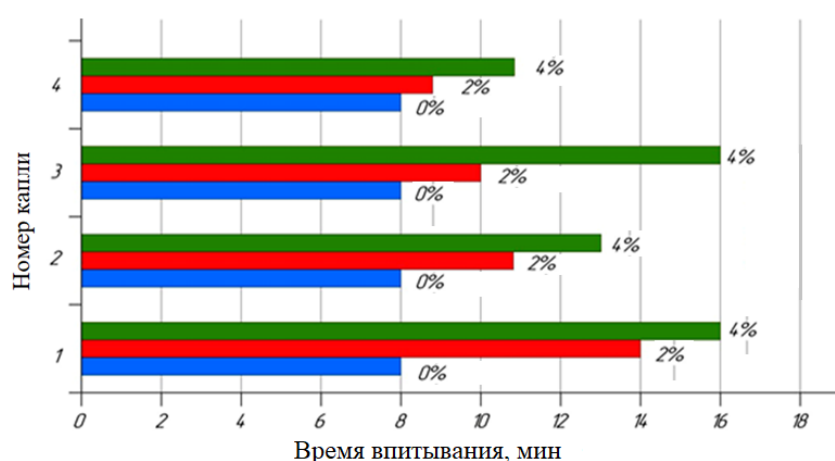


Рис. 5. Зависимость времени впитывания влаги образцами (переходный торф, $R_T = 5...10\%$) от концентрации добавки ГКЖ-94

Пленки этилгидросилоксана (ЭГС) достаточно надежно изолируют гидрофобную пористую структуру торфа от проникновения капельножидкой влаги,

причем это относится ко всем исследованным видам торфа. Установлено увеличение времени смачивания поверхности от 1,4 до 2,7 раза. Вероятнее всего, такое расхождение по времени связано с качеством перемешивания торфомассы перед формованием.

Следующий показатель, определяющий качество кускового торфа, – это водопоглощение, которое для торфа определялось за 48 часов его нахождения в воде в полностью погруженном состоянии. Как правило, интенсивность и величина водопоглощения выше в верховом торфе низкой степени разложения [3, 14].

Проведенные эксперименты показали, что максимальная величина водопоглощения была достигнута за 48 часов верховым торфом и составила около 4 кг/кг. Гидрофобизация структуры не оказала существенного влияния на величину максимального водопоглощения, уменьшив ее всего на 5...7 % (рис. 6).

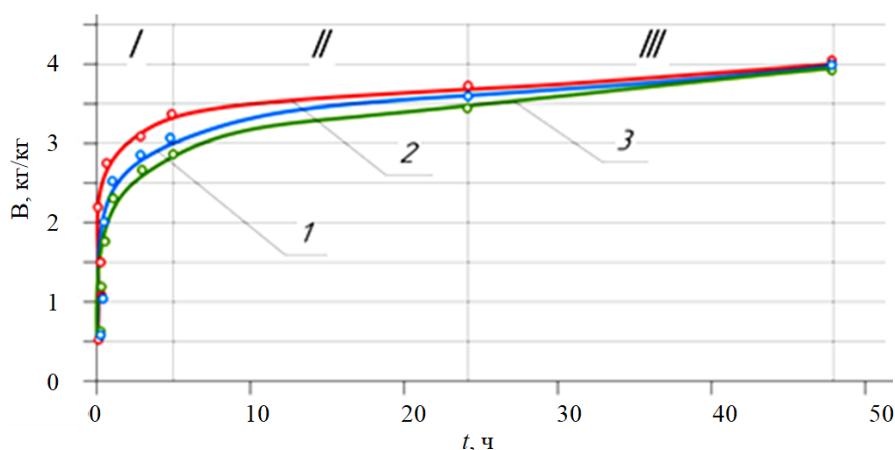


Рис. 6. Кинетика водопоглощения кускового торфа за 48 часов (верховой торф, $R_T = 5...10\%$) в зависимости от концентрации (масс. %) ЭГС:
1 – 0 %; 2 – 2 %; 3 – 4 %

Сравнительно высокого водопоглощения удалось достигнуть за счет значительного содержания в куске слаборазложившихся растительных остатков и достаточно большого объема пор.

Максимальная величина водопоглощения кусков переходного высокоразложившегося торфа составила чуть больше 2 кг/кг за 48 часов (рис. 7). Для торфа высокой степени разложения снижение величины максимального водопоглощения при использовании гидрофобизатора было существенно и достигло около 30 %.

Двукратное уменьшение максимального водопоглощения в таком торфе стало возможным за счет изменения его нативной структуры, при анализе которой можно отметить отсутствие относительно крупных пор, характерных для низкоразложившегося торфа, наряду с наличием фрагментов разложившихся растительных остатков и агрегатов гуминовых веществ [14].

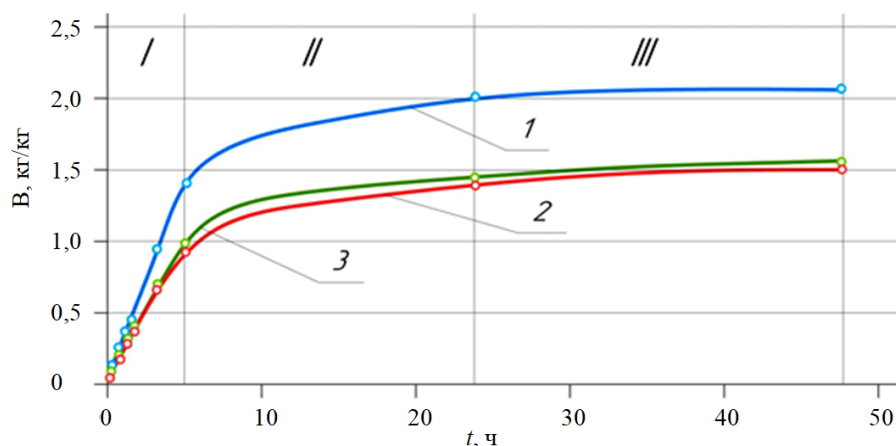


Рис. 7. Кинетика водопоглощения кускового торфа за 48 часов (переходный торф, $R_T = 35\%$) в зависимости от концентрации (масс. %) ЭГС:
 1 – 0 %; 2 – 2 %; 3 – 4 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка технологии производства гидрофобно-модифицированного кускового торфа открывает возможность предварительной модификации торфяного сырья, что приводит к улучшению качественных характеристики выпускаемой продукции, повышению основных технологических показателей добычи и, в свою очередь, положительно отражается на технологическом процессе производства в целом.

Снижение крошимости торфа позволяет увеличить срок его хранения без снижения качества, а также делает возможным транспортировку кускового торфа в удаленные населенные пункты. Торфяные куски с модифицированными добавками способны к снижению водопоглотительной способности, что благоприятно сказывается в процессе их полевой сушки и хранения на открытых площадках [15].

Использование гидрофобных добавок при производстве кускового торфа в полевых условиях улучшает качественные характеристики исходного торфяного сырья, что снижает зависимость технологического процесса от метеорологических условий региона и негативного влияния горно-геологических условий, а также позволяет насытить торфяную матрицу дополнительными гидрофобными компонентами, применяемыми в качестве обогащенного сырья для глубокой химической переработки материалов [16].

ЛИТЕРАТУРА

1. Яблонев А.Л., Пухова О.В. Современные направления использования торфа // *Вестник ТГТУ*. 2010. № 17. С. 104–107.
2. Мисников О.С., Беяков В.А. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. Добыча кускового торфа и сапропеля: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2016. 168 с.
3. Купорова А.В. Геотехнологическое обоснование производства гидрофобно-модифицированного кускового торфа в полевых условиях: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2024. 209 с.
4. Справочник по торфу / под ред. А.В. Лазарева и С.С. Корчунова. М.: Недра, 1982. 760 с.

5. Купорова А.В. Процессы структурообразования в технологии добычи кускового торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 25–35.
6. Misnikov O., Yablonev A., Kuporova A. Theories of Peat Systems Structure Formation and Prospects for their Practical Use in the Production of Molded Fuel // *AIP Conference Proceedings «Modern Approaches in Engineering and Natural Sciences»*. 2023. V. 2526. P. 040003.
7. Лиштван И.И., Базин Е.Т., Гамаюнов Н.И., Терентьев А.А. Физика и химия торфа: учебное пособие для вузов. М.: Недра, 1989. 304 с.
8. Сергеев Ф.Г. Исследование водопоглонительных свойств мелкокускового торфа и торфяной подстилки: дис. ... канд. техн. наук. Калинин, 1970. 174 с.
9. Купорова А.В., Пухова О.В. Водно-технические свойства торфяного топлива с гидрофобной добавкой // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018. № 2. С. 201–207.
10. Базин Е.Т., Копенкин В.Д., Косов В.И., Корчунов С.С., Петрович В.М. Технический анализ торфа. М.: Недра, 1992. 431 с.
11. Мисников О.С. Изменения водно-физических свойств торфа и торфяных залежей при техногенном воздействии // *Техника и технология горного дела*. 2019. № 2 (5). С. 19–32.
12. Пашенко А.А., Воронков М.Г., Михайленко Л.А. Гидрофобизация. Киев: Наукова думка, 1973. 238 с.
13. Антонов В.Я., Малков Л.М., Гамаюнов Н.И. Технология полевой сушки торфа: учебное пособие. М.: Недра, 1981. 239 с.
14. Афанасьев А.Е., Мисников О.С. Оценка структурных характеристик при сушке формованных органических и органоминеральных биогенных материалов // *Теоретические основы химической технологии*. 2003. Т. 37. № 6. С. 620–628.
15. Misnikov O. Scientific basis of a new method for hydrophobic modification of mineral binders using peat products // *Mires and Peat*. 2016. V. 18. Article 22. P. 1–15.
16. Misnikov O. Perspectives for application of moulded sorption materials based on peat and mineral compositions // *E3S Web of Conferences «II nd International Innovative Mining Symposium»*. 2017. V. 21. P. 01020.

Для цитирования: Купорова А.В. Оценка водно-физических свойств кускового торфа с применением гидрофобизации торфомассы перед формованием // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 3 (31). С. 57–65.

ASSESSMENT OF WATER-PHYSICAL PROPERTIES OF LUMP PEAT WITH APPLICATION OF PEAT MASS HYDROPHOBIZATION BEFORE FORMING

A.V. KUPOROVA, Cand. Sc.

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

The article discusses the positive effect of hydrophobization of peat mass before molding on the water-technical properties of sod peat. The results of studies are presented to determine the water-absorbing and water-repelling abilities of sod peat samples. It has been

established that the use of hydrophobic additives in the production of lump peat improves the quality characteristics of the initial peat raw materials, has a positive effect on the water-physical characteristics of the finished product, makes it possible to reduce the dependence of production technology on the meteorological conditions of the production region, as well as to reduce the drying elongation to zero due to moisture exchange with the deposit. Application of hydrophobic additives in technology of lump peat production makes it possible to reduce initial moisture content of peat mass before moulding, thus reducing energy costs for production.

Keywords: sod peat, extraction, field drying, hydrophobic additive, technology, water absorption, water-repellent ability.

Поступила в редакцию/received: 27.02.2026; после рецензирования/revised: 17.03.2026;
принята/accepted: 02.04.2026

УДК 621.928.26

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-65-73

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ДИСКА ВАЛКОВОГО СОРТИРУЮЩЕ-СЕПАРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

С.М. КОЧКАНЯН, канд. техн. наук, А.В. КОНДРАТЬЕВ, д-р техн. наук

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

© Кочканян С.М., Кондратьев А.В., 2026

Представлена математическая модель расчета толщины диска валкового сортирующе-сепарирующего устройства. Модель позволяет учитывать комплекс динамических нагрузок, возникающих при ударном взаимодействии диска с частицами тяжелой фракции, а также центробежные напряжения, обусловленные вращением дисков. При помощи полученной расчетной зависимости можно установить прямую взаимосвязь между кинематическими, конструктивными и технологическими параметрами валкового сортирующего устройства. На основании модели выполнена графическая интерпретация влияния массы тяжелой фракции, частоты вращения и радиуса диска на минимально допустимую его толщину. Установлено, что толщина диска монотонно возрастает с увеличением его радиуса и частоты вращения, а также с повышением массы транспортируемого камня, вследствие роста ударных нагрузок со стороны твердых включений. Практическая значимость модели заключается в возможности рационального выбора толщины дисков при проектировании сортирующих устройств валкового типа для гравия и щебня, что способствует повышению надежности и эффективности их работы.

Ключевые слова: валковое сортирующе-сепарирующее устройство, частота вращения валов, толщина дисков, ударная нагрузка, математическая модель, гравий и щебень.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы сортировки и сепарации полидисперсных минеральных сыпучих материалов являются важным этапом технологических схем в горнодобывающей, строительной и перерабатывающей промышленности. Эффективность последующих

операций дробления, обогащения и транспортирования в значительной степени определяется качеством предварительного разделения материала по крупности и плотности.

Современные валково-дисковые сепарирующие устройства широко применяются для обработки минеральных смесей, однако их работоспособность и ресурс во многом зависят от прочности и долговечности дисковых рабочих органов. В процессе эксплуатации диски подвергаются многократным ударно-контактным воздействиям со стороны частиц крупной фракции, что приводит к возникновению изгибных и контактных напряжений [1–5]. Эффективность работы таких устройств в значительной степени определяется радиусом и толщиной дисков, частотой вращения валов, шагом установки дисков на валу, а также прочностными характеристиками дисков [6–8].

Анализ существующих методик расчета показывает, что в большинстве случаев дисковые рабочие органы рассматриваются в статической или квазистатической постановке без достаточного учета динамического характера взаимодействия с перерабатываемым материалом. Это приводит к недооценке действующих нагрузок и, как следствие, к ускоренному износу или разрушению элементов конструкции.

В связи с вышесказанным актуальной задачей является разработка инженерно обоснованной расчетной методики определения толщины диска валкового сортирующе-сепарирующего устройства, обеспечивающей его прочность и работоспособность в условиях ударно-контактного взаимодействия с частицами максимальной крупности.

Цель работы заключается в получении аналитической зависимости для определения расчетной толщины дискового рабочего органа с учетом:

- кинематических параметров устройства;

- геометрических характеристик диска;

- механических свойств материала;

- динамического характера взаимодействия «частица – диск».

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- разработка математической модели расчета толщины диска с учетом ударных, изгибающих и центробежных нагрузок;

- выполнение графоаналитических исследований влияния основных параметров на напряженно-деформированное состояние дисков;

- определение рациональных параметров сепарирующего устройства, обеспечивающих надежность и эффективность процесса сортировки.

ОБЪЕКТ, МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Объектом исследования является валковое сортирующе-сепарирующее устройство, предназначенное для разделения полидисперсных минеральных и минерально-органических сыпучих материалов. Устройство включает систему последовательно расположенных валов с многогранными дисками.

Аналитические исследования выполнялись с использованием положений линейной теории упругости, динамики удара и инженерных подходов к оценке напряженного состояния вращающихся дисков. Расчет напряженно-деформированного состояния дискового рабочего органа осуществлялся в квазистатической постановке с приведением ударного воздействия к эквивалентной средней силе.

В расчетной модели диск рассматривался как консольно закрепленный элемент с защемлением по внутреннему диаметру в зоне посадки на вал. Нагрузка прикладывалась в точке контакта на наружной кромке диска. Ударное взаимодействие

частицы с диском моделировалось как кратковременный импульсный контакт с передачей части кинетической энергии вращающегося диска частице. Для описания динамического характера взаимодействия использовалась энергетическая постановка с введением эффективной деформации контакта, учитывающей суммарную податливость системы «диск–частица–слой материала».

В расчетах учитывались:

- изгибающие напряжения от сосредоточенной ударной нагрузки;
- напряжения вращения от центробежных сил;
- локальный характер передачи нагрузки в зоне контакта.

Для оценки влияния конструктивных и кинематических параметров проводился параметрический анализ зависимостей расчетной толщины диска от частоты его вращения, радиуса диска и массы взаимодействующей с ним частицы. Работу диска рассматривали в области линейной упругости материала при отсутствии пластической деформации.

Пределы варьирования факторов:

- размер материала – 0,1...0,3 м;
- масса частицы – 5...15 кг;
- плотность частицы – 1 800...2 900 кг/м³;
- радиус диска – 0,05...0,17 м;
- междисковый промежуток – 0,03 м;
- частота вращения дисков – 50...150 об/мин .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С учетом характера нагружения расчетная схема диска принималась в виде консольного элемента, подверженного изгибу под действием эквивалентной ударной силы F_k и напряжений вращения от центробежных сил. Диск радиусом R_d с окружной скоростью v_0 взаимодействовал с частицей массой m_k , в результате чего частица изменяла скорость и траекторию движения (рис. 1).

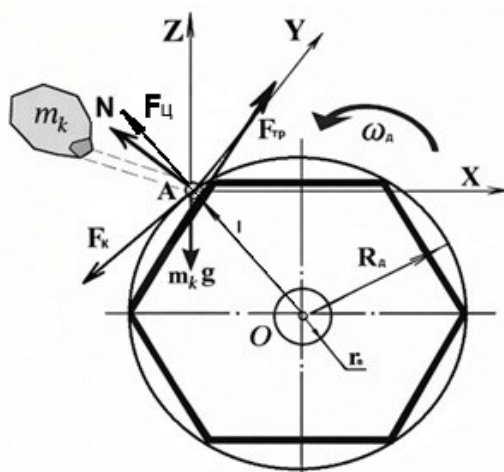


Рис. 1. Схема импульсно-ударного взаимодействия минеральной частицы с гранью многогранного диска радиуса R_d

Анализ силового взаимодействия показывает, что максимальные напряжения в диске определяются изгибом от сосредоточенной ударной нагрузки, тогда как напряжения от кручения в рассматриваемых режимах не являются определяющими.

Для расчетной модели взаимодействия диска с частицей приняты следующие допущения:

диск рассматривается как изотропный упругий элемент, работающий преимущественно на изгиб;

ударное воздействие моделируется квазистатически эквивалентной силой F_k в зоне контакта;

контакт локализован и локальные напряжения по Герцу не рассматриваются, поскольку они не характеризуют общую изгибающую прочность диска;

температурные эффекты, износ и остаточные напряжения не учитываются;

расчет выполняется для наиболее неблагоприятного взаимодействия с частицей максимальной массы.

Принятые допущения позволяют получить инженерно обоснованную оценку напряженно-деформированного состояния дискового рабочего органа в условиях эксплуатации валкового сортирующе-сепарирующего устройства.

Расчетная толщина диска b_d находится из условия прочности, при котором эквивалентное напряжение не превышает допускаемое:

$$\sigma_{\text{экв}} \leq \frac{[\sigma]}{n_3}, \quad (1)$$

где $[\sigma]$ – допускаемое напряжение материала диска, Па; $n_3 = 1,5$ – коэффициент запаса прочности.

Рассматривая изгиб диска от ударного воздействия, изгибающий момент у основания вычисляем по формуле

$$M = F_k l, \quad (2)$$

где l – расчетный вылет от вала до точки контакта на наружной кромке диска $l = R_d - r_v$, где R_d – радиус диска, м; r_v – радиус вала, на который насажен диск, м.

Эквивалентная средняя сила за время контакта находится из условия преобразования кинетической энергии в работу деформации:

$$F_k = \frac{m_{\text{эфф}} v_0^2}{2\Delta_{\text{эфф}}},$$

где $m_{\text{эфф}}$ – эффективная масса, кг, которая характеризует долю массы частицы, участвующую в ударном взаимодействии с диском:

$$m_{\text{эфф}} = \varphi_m m_k;$$

v_0 – окружная скорость дисков, м/с:

$$v_0 = \frac{\pi D_d n_d}{60},$$

тогда

$$F_k = \frac{\varphi_m m_k (\pi R_d n_d)^2}{1800 \Delta_{\text{эфф}}}, \quad (3)$$

где $\varphi_m = 0,2$ – коэффициент распределения ударной энергии между дисками и слоем материала; $m_{\square}$ – масса минеральной частицы, кг; n_d – частота вращения дисков, об/мин; $\Delta_{\text{эфф}} = 0,010 \dots 0,015$ м – эффективная деформация контакта «диск – частица – слой», учитывающая локальное смятие и прогиб диска [9].

Для оценки напряжений изгиба диск рассматривается как консольная полоса эффективной ширины a и толщины b_d . Модуль сопротивления сечения

$$W = \frac{ab_d^2}{6}. \quad (4)$$

Эффективная ширина зоны передачи нагрузки принимается в виде:

$$a = k_b t_{\text{шд}}, \quad k_b \in [0,6; 1,0],$$

где $t_{\text{шд}}$ – шаг установки дисков по оси вала, м; k_b – коэффициент, учитывающий локализацию контакта на грани диска [10].

Максимальное изгибающее напряжение определяется как

$$\sigma_b = \frac{M}{W}. \quad (5)$$

Подставив выражения (2) и (4) в формулу (5), получим:

$$\sigma_b = \frac{6F_k l}{ab_d^2}, \quad (6)$$

Для вращающегося диска напряжения от центробежных сил принимаются по инженерной оценке, приведенной в источниках [11, 12]. Она позволяет эффективно решать задачи обеспечения надежности вращающихся дисков в различных машинах и агрегатах.

$$\sigma_c = k_c \cdot \rho_d \cdot \omega_d^2 R_d^2, \quad (7)$$

где $k_c = 0,3 \dots 0,4$ – инженерный коэффициент, учитывающий реальную форму диска; ρ_d – плотность материала диска, кг/м³; $\omega_d = \pi n_d / 30$ – угловая скорость, рад/с.

Эквивалентное напряжение принимается по инженерной оценке:

$$\sigma_{\text{экв}} \approx \sqrt{\sigma_b^2 + \sigma_c^2}. \quad (8)$$

Подставив выражения (6), (7) в условие прочности (1), получим:

$$\sqrt{\sigma_b^2 + \sigma_c^2} \leq \frac{[\sigma]}{n_3}. \quad (9)$$

Таким образом, подстановкой выражений (3), (6), (7) в (9) получим зависимость для определения расчетной толщины диска валкового сортирующе-сепарирующего устройства:

$$b_d \geq \sqrt{\frac{(R_d - r_b) \cdot n_3 \cdot \varphi_m \cdot m_k \cdot \pi^2 R_d^2 n_d^2}{300 t_{шд} \cdot \Delta_{эфф} \sqrt{[\sigma]^2 - n_3^2 \left(\frac{k_c \cdot \rho_d \cdot \pi^2 \cdot R_d^2 \cdot n_d^2}{900} \right)^2}}} . \quad (10)$$

Выражение (10) устанавливает аналитическую связь между кинематическими параметрами (n_d, v_0), конструктивными параметрами ($R_d, t_{шд}, l, b_d$) и технологическими характеристиками материала ($m_k, \varphi_m, \Delta_{эфф}$).

Рост частоты вращения и радиуса дисков, а также массы минеральной частицы приводит к увеличению ударной силы F_k и напряжений вращения σ_c , что обуславливает необходимость увеличения толщины b_d . Полученная методика позволяет инженерно обоснованно назначать толщину дисков на стадии проектирования валковых сортирующе-сепарирующих устройств.

Для оценки влияния конструктивных и кинематических параметров выполнен параметрический анализ зависимостей $b_d(n_d)$, $b_d(R_d)$ и $b_d(m_k)$ при фиксированных условиях: $s = 0,03$ м, $d_b = 0,05$ м, $\Delta_{эфф} = 0,012$ м, $\varphi_m = 0,2$, $k_c = 0,35$, $\rho_d = 7800$ кг/м³, $[\sigma] = 240$ МПа, $n_3 = 1,5$.

Согласно выражению (10), с увеличением частоты вращения n_d возрастают ударные и центробежные нагрузки, вследствие чего зависимость $b_d(n_d)$ является монотонно возрастающей функцией (рис. 2).

Увеличение массы крупной фракции m_k приводит к возрастанию энергии ударного взаимодействия и, как следствие, к увеличению требуемой толщины диска. Зависимость $b_d(m_k)$ имеет возрастающий нелинейный характер (рис. 3).

При увеличении радиуса R_d возрастает как окружная скорость кромки, так и изгибающий момент, что ведет к увеличению расчетной толщины диска. В исследованном диапазоне зависимость $b_d(R_d)$ носит монотонно возрастающий характер (рис. 4).

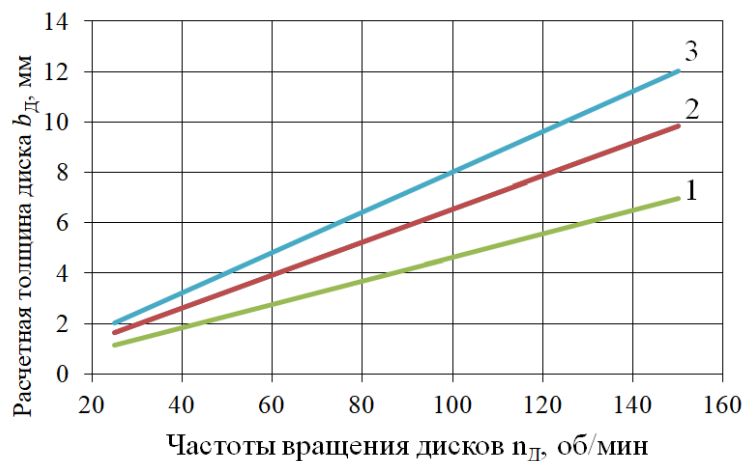


Рис. 2. Влияние частоты вращения дисков на расчетную толщину диска при m_k , кг: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15 ($R_d = 0,17$ м)

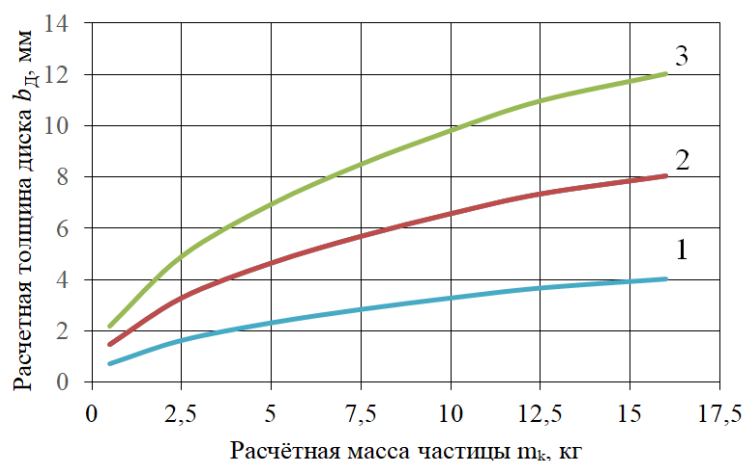


Рис. 3. Влияние расчетной массы частицы на расчетную толщину диска при n_d , об/мин:
1 – 50; 2 – 100; 3 – 150 ($R_d = 0,17$ м)

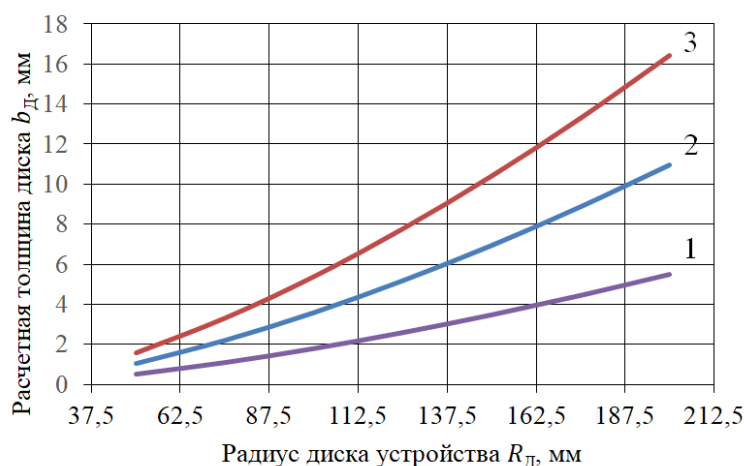


Рис. 4. Влияние радиуса диска на расчетную толщину диска при n_d , об/мин:
1 – 50; 2 – 100; 3 – 150 ($m_k = 15$ кг)

ВЫВОДЫ

Получена аналитическая зависимость для определения расчетной толщины диска валкового сортирующе-сепарирующего устройства по условию прочности с учетом совместного действия ударной и центробежной составляющих нагрузки.

Ударно-контактное воздействие частицы на диск учтено через эквивалентную среднюю силу F_k , определяемую в энергетической постановке по эффективной деформации $\Delta_{эфф}$ и коэффициенту распределения нагрузки φ_m , что позволяет учитывать динамический характер взаимодействия «частица – диск» в проектных расчетах.

Прочностной расчет выполнен с учетом совместного действия изгибающих и центробежных напряжений на диск как консольно-закрепленный элемент с защемлением по внутреннему диаметру в зоне посадки на вал.

Установлено, что расчетная толщина диска монотонно возрастает с увеличением частоты вращения валов, радиуса диска и массы частицы.

Предложенный методический подход может использоваться при проектировании валково-дисковых сортирующе-сепарирующих устройств и может

быть адаптирован для оценки элементов, работающих в условиях ударно-контактного взаимодействия с полидисперсными средами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная математическая модель определения расчетной толщины диска может служить основой для разработки инженерной методики определения основных конструктивных и кинематических параметров валковых сортирующе-сепарирующих устройств с учетом условий их эксплуатации. Результаты работы могут быть использованы при создании новых и модернизации существующих валково-дисковых сепараторов для переработки полидисперсных минеральных и минерально-органических сыпучих смесей, а также при разработке инженерных рекомендаций по проектированию рабочих органов машин данного класса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юдин А.В., Шестаков В.С. Выбор оборудования и оценка схем мобильных карьерных комплексов при отработке закарстовых месторождений // *Известия вузов. Горный журнал*. 2017. № 1. С. 92–100.
2. Бондарев Ю.Ю., Звонарев Е.И., Иванов С.Л., Шишлянников Д.И. Валково-дисковый сепаратор автономного комплекса добычи и переработки торфяного сырья на топливо // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2015. № 14. С. 72–81.
3. Михайлова Н.В., Бизяев О.Ю., Спиридонов П.А. Устройство валкового типа для классификации влажного сырья // *Обогащение руд*. 2016. № 4. С. 48–55.
4. Абдуллах А.К. Обоснование конструкции и параметров валкового грохота для сортировочных комплексов дорожно-строительных машин: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2014. 118 с.
5. Кузев Д.П. Повышение износостойкости дисков валкового грохота для сортировки кокса: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2009. 140 с.
6. Русинкевич В.А., Кочкян С.М., Кондратьев А.В. Результативность грохочения гравия в зависимости от параметров валковой желобообразной сортировки со шнековым интенсификатором // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. № 5. С. 188–192.
7. Кондратьев А.В., Кочкян С.М., Лысенко Т.И., Гусаров А.А. К вопросу распределения и просеивания гравия по поверхности желобообразного валкового сита // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 46–53.
8. Борщов Т.С., Гинтовт И.А. Культуртехника в Нечерноземной зоне. М.: Колос, 1981. 253 с.
9. *Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: Сб. трудов 14-й Всероссийской научной конференции с международным участием*. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2024. 324 с.
10. Ржаницын А.Р. Строительная механика: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1982. 400 с.
11. Болотин В.В. Динамика и прочность машин. М.: Машиностроение, 1979. 344 с.
12. Афанасьев А.А. Задачи определения напряженно-деформированного состояния вращающихся дисков: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Воронеж, 2015. 124 с.

Для цитирования: Кочкян С.М., Кондратьев А.В. Определение толщины диска валкового сортирующе-сепарирующего устройства // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 3 (31). С. 65–73.

DETERMINING THE THICKNESS OF A DISK OF A ROLLING SORTING AND SEPARATING DEVICE

S.M. KOCHKANYAN, Cand. Sc., A.V. KONDRATYEV, Dr. Sc.

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

A mathematical model for calculating the thickness of a roll-sorting and separating device is presented. The model allows for the consideration of a complex of dynamic loads arising from the impact of the disk with heavy fraction particles, as well as centrifugal stresses caused by the rotation of the disks. The obtained calculation dependence allows for the establishment of a direct relationship between the kinematic, design, and technological parameters of the roll-sorting device. Based on the model, a graphical interpretation of the influence of the heavy fraction mass, rotational speed, and disk radius on the minimum allowable disk thickness is provided. The practical significance of the model lies in the possibility of rationally selecting disk thickness when designing roller sorting devices for gravel and crushed stone, which contributes to increased reliability and efficiency.

Keywords: roller sorting and separating device, shaft rotation speed, disc thickness, impact load, mathematical model, gravel, and crushed stone.

Поступила в редакцию/received: 15.04.2026; после рецензирования/revised: 17.04.2026;
принята/accepted: 28.04.2026

УДК 622.05:544.25:621.89

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-73-85

МАГНИТНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ ЖИДКОСТИ В ГОРНОМ ДЕЛЕ: ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, А.Л. ЯБЛОНЕВ, д-р техн. наук

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

© Болотов А.Н., Яблонев А.Л., 2026

Экстремальные условия эксплуатации горнодобывающего оборудования (абразивная пыль, высокая влажность, ударно-вибрационные нагрузки, широкий диапазон температур) лимитируют ресурс традиционных смазочных материалов и уплотнительных устройств. В статье представлен аналитический обзор физико-химических, реологических и трибологических свойств магнитных смазочных жидкостей (МСЖ) как класса «интеллектуальных» жидкостей и смазок. На основе

критического анализа работ российских и зарубежных авторов систематизированы данные о влиянии концентрации наночастиц магнетита, параметров магнитного поля и материалов пар трения на коэффициент трения, износ и несущую способность МСЖ. Обобщены результаты экспериментальных испытаний МСЖ в магнитожидкостных подшипниках скольжения, уплотнениях валов, роликах ленточных конвейеров, буровом инструменте, зубчатых передачах редукторов, а также в процессах магнитной сепарации, магнитофлотации, смазочно-охлаждающих жидкостях для режущего инструмента и гидроразрыва пласта. В табличной форме представлены количественные показатели снижения вращательного сопротивления (до 73 %), повышения водостойкости (сохранение свойств после 24 часов в угольном шламе), увеличения ресурса (в 1,6...7 раз), извлечения золота при магнитофлотации (92...97 % против 75...82 %) и снижения износа режущего инструмента (на 50...70 %). Обозначены основные перспективные направления: крупнозазорные уплотнения (до 0,8 мм), гибридные системы «смазка + герметизация», адаптивные магнитореологические демпферы, а также интеллектуальные системы мониторинга состояния МСЖ. Приведен прогноз развития технологий на период до 2035 г.

Ключевые слова: магнитная жидкость, феррожидкость, трибологические свойства, магнитожидкостный подшипник, магнитожидкостное уплотнение, ленточный конвейер, шарошечное долото, магнитофлотация, смазочно-охлаждающая жидкость, наночастицы магнетита.

ВВЕДЕНИЕ

Горнодобывающая промышленность является одной из наиболее фондоемких отраслей, где простои оборудования из-за отказов узлов трения и уплотнений приводят к значительным экономическим потерям. Экстремальные условия эксплуатации горной техники включают комплекс негативных факторов: высокие концентрации абразивной пыли (до 300 мг/м³ и выше), повышенную влажность (относительная влажность до 100 %, часто в сочетании с агрессивными шахтными водами), ударно-вибрационные нагрузки, широкий диапазон температур (от –50 °С на открытых горных работах в Арктике до +150 °С в подшипниках дробилок и мельниц), а также наличие взрывоопасных газов (метан в угольных шахтах). Традиционные смазочные материалы – пластичные смазки, промышленные масла, а также уплотнительные устройства (лабиринтные, манжетные) – в таких условиях часто не обеспечивают требуемой долговечности. По данным китайских исследователей [3], отказ ролика шахтного ленточного конвейера из-за заклинивания подшипника является одной из самых частых причин простоев, при этом традиционные лабиринтные уплотнения быстро забиваются пылью и пропускают воду.

В поиске решений для повышения надежности и ресурса горного оборудования в последние десятилетия активно развивается направление триботехники с использованием магнитных смазочных жидкостей (МСЖ) – коллоидных систем, способных удерживаться в зоне трения под действием внешнего магнитного поля. В отличие от обычных смазок, МСЖ не выдавливаются из зазора при высоких нагрузках, могут выполнять одновременно функцию смазки и герметизации, а в ряде случаев позволяют управлять трибологическими свойствами за счет изменения магнитного поля. История применения МСЖ в горном деле началась в 1970–1980-х гг. в СССР, где в Институте физики металлов УрО РАН (под руководством М.И. Шлиомиса) и в Тверском государственном техническом университете (работы А.Н. Болотова и др.) были заложены основы теории и практики использования магнитных жидкостей для смазки, уплотнения горных машин и обогащения полезных ископаемых. В настоящее время исследования активно продолжаются в России и Китае, однако промышленное

внедрение МСЖ в горное дело остается ограниченным опытно-промышленными испытаниями.

Научная проблема заключается в отсутствии систематизированных данных о физико-химических, реологических и трибологических свойствах МСЖ применительно к реальным условиям эксплуатации горного оборудования, а также в недостаточной разработанности конструктивных решений (например, крупнозазорных уплотнений) и методов контроля состояния МСЖ в процессе работы.

Цель настоящей работы – на основе личного опыта, проведенных исследований, анализа литературных и патентных источников: 1) систематизировать физико-химические и трибологические свойства МСЖ; 2) обобщить экспериментально подтвержденные результаты применения МСЖ в узлах трения, уплотнениях и технологических процессах горного оборудования; 3) представить количественные показатели эффективности; 4) определить перспективные направления и прогноз развития технологий.

Под МСЖ мы здесь понимаем не фиксированный класс узкоспециализированных сред, а управляемые коллоидные системы, позволяющие в широких пределах адаптировать их магнитные и триботехнические характеристики под требования конкретного узла или технологического процесса горного производства.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Магнитная смазочная жидкость представляет собой термодинамически стабильную коллоидную систему, состоящую из трех основных компонентов: ферромагнитных наночастиц (размером 5...15 нм), поверхностно-активного вещества и жидкой дисперсионной среды. В качестве магнитной фазы чаще всего используется магнетит Fe_3O_4 или ферриты MeFe_2O_4 ($\text{Me} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Mn}$), обладающие высокой намагниченностью насыщения (до 80...90 А · м²/кг) и химической стабильностью в неокислительной среде. Наночастицы синтезируются методами химической конденсации (соосаждение из растворов солей Fe^{2+} и Fe^{3+}), механического измельчения или плазмохимическим способом. Поверхностно-активное вещество (олеиновая кислота, жирные кислоты с длиной цепи C12–C18, полимерные стабилизаторы) адсорбируется на поверхности наночастиц, создавая стерический или электростатический барьер, предотвращающий агрегацию и седиментацию за счет минимизации энергии межчастичного взаимодействия. Дисперсионная среда может быть минеральной (индустриальные масла И-20, И-40), синтетической (полиальфаолефины, сложные эфиры) или кремнийорганической (полиэтилсилоксаны ПЭС-5, ПЭС-10), что определяет вязкостно-температурные характеристики МСЖ.

Ключевые физико-химические параметры, устанавливающие пригодность МСЖ для горного оборудования, включают намагниченность насыщения M_s (характеризует силу магнитного удержания смазки в зазоре); кинематическую вязкость ν (влияет на гидродинамический режим смазки); температурную стабильность (диапазон рабочих температур) и коллоидную устойчивость. Для большинства промышленных МСЖ M_s лежит в диапазоне 20...80 кА/м (250...1 000 Гс). Например, коммерческий состав VacuMAG™ (Liquids Research) имеет намагниченность до 60 кА/м, а лабораторные образцы на основе полиэтилсилоксана ПЭС-5 с 10 % масс. магнетита достигают 40 кА/м. Кинематическая вязкость при 27 °С варьируется от 100 до 25 000 мм²/с в зависимости от основы и концентрации частиц: для подшипников скольжения предпочтительны вязкости 500...2 000 мм²/с, для уплотнений – более высокие (до 25 000 мм²/с). Температурная стабильность МСЖ определяется как термической устойчивостью дисперсионной среды, так и десорбцией пеоверхностно-активных

веществ с поверхности частиц. Минеральные и синтетические масла обеспечивают рабочий диапазон от -40 до $+120$ °С, а силиконовые и фторорганические основы – до $160...200$ °С. Разработанные составы на фторорганике с высокотемпературными присадками сохраняют стабильность до 378 °С [13].

Коллоидная стабильность МСЖ – способность противостоять агрегации и расслоению при длительном хранении, вибрациях и воздействии механических примесей – оценивается по седиментационной устойчивости (отсутствие осадка в течение нескольких месяцев) и магнитофоретической стабильности (сохранение однородности в градиентном поле). Экспериментально установлено, что при повышении температуры с -50 до $+95$ °С динамическая вязкость магнитной жидкости снижается в 1,87 раза, что свидетельствует об отсутствии фазовых переходов в этом интервале [10]. Для горной техники, работающей в запыленной и влажной среде, наиболее критична устойчивость к абразивным частицам: испытания показали, что МСЖ на силиконовой основе сохраняют свои свойства после 24-часового воздействия угольным шламом, тогда как традиционные пластичные смазки теряют консистенцию.

Трибологические свойства магнитных смазочных жидкостей

Трибологические характеристики МСЖ определяются совокупностью факторов: составом и концентрацией магнитных наночастиц, свойствами дисперсионной среды, наличием, интенсивностью и конфигурацией внешнего магнитного поля, а также материалами и геометрией контактирующих поверхностей. В отличие от обычных смазок, МСЖ в магнитном поле проявляют два ключевых свойства: магнитореологическое (изменение эффективной вязкости и появление предельного напряжения сдвига за счет формирования цепочечных структур из наночастиц) и магнитофоретическое удержание (притяжение магнитной жидкости к областям с максимальным градиентом магнитного поля). В подшипниках и уплотнениях основную роль играет именно удержание: пондеромоторная сила $F_m = \mu_0(M \cdot \nabla)H$ (где M – намагниченность; H – напряженность поля) прижимает феррожидкость к поверхности вала, формируя замкнутый цикл циркуляции смазки без внешнего насоса.

Количественный критерий эффективности удержания МСЖ в рабочем зазоре B_m определяется как отношение характерной магнитной силы к силе вязкого трения: $B_m = \mu_0 M H' L^2 / (\eta v)$, где μ_0 – магнитная постоянная; M – намагниченность насыщения МСЖ; $H' = |\nabla H|$ – градиент напряженности магнитного поля в зазоре; L – характерный линейный размер (обычно ширина зазора или длина уплотнительной щели), м; η – динамическая вязкость МСЖ; v – характерная скорость движения поверхности (линейная скорость вала).

Физический смысл B_m заключается в сравнении двух конкурирующих механизмов: магнитная сила стремится удержать МСЖ в зоне максимального поля (например, в зазоре между валом и магнитом), тогда как вязкая сила, обусловленная сдвиговым течением, стремится вынести жидкость из зазора. При $B_m \gg 1$ магнитное удержание доминирует, смазочная пленка стабильна, выдавливание смазки практически отсутствует. При $B_m \lesssim 1$ вязкие силы сопоставимы с магнитными, что может привести к частичной потере смазки и переходу в режим граничного трения.

Для типовых конструкций магнитожидкостных подшипников и уплотнений горного оборудования (радиальный зазор $L = 0,1...0,3$ мм, градиент поля $H' = 10^5$ А/м², вязкость $\eta = 0,1...0,5$ Па · с, окружная скорость $v = 1...5$ м/с, намагниченность $M = 20...40$ кА/м) значение B_m составляет от 10 до 10^3 , что гарантирует надежное удержание смазки и устойчивую работу узла в гидродинамическом режиме.

Влияние магнитного поля на трение и износ исследовалось на различных трибометрах, таких как четырехшариковая машина трения, кольцо-цилиндрический трибометр, роликовый стенд). На кольцо-цилиндрическом трибометре авторы работы [15] установили, что распределение интенсивности магнитного поля на поверхности трения значительно влияет на трибологические свойства, а в присутствии внешнего поля МСЖ демонстрируют более низкий коэффициент трения (на 15...25 %) по сравнению с чистой дисперсионной средой, причем срок службы смазки увеличивается в 2...3 раза. В работе [16] изучали трибологические характеристики при смазке МСЖ магнитных поверхностей с микроструктурированными магнитными пленками. Результаты показали, что образец с 5 % площадного соотношения массивованного магнита обеспечивает наименьшее трение при определенных нагрузках и скоростях, при этом более высокая магнитная интенсивность поверхности улучшает антифрикционные свойства при повышенных скоростях скольжения (0,062...0,188 м/с). В работе [10] экспериментально определили, что момент трения в магнитожидкостном уплотнении возрастает в 27,7 раза при увеличении частоты вращения вала n с 400 до 2 000 мин⁻¹ и величины магнитной индукции B с 0,4 до 1,0 Тл. Рост момента трения связан с увеличением структурной составляющей за счет возрастания силы межчастичных взаимодействий в магнитной жидкости при увеличении градиента магнитного поля. Наиболее низкое значение момента трения наблюдается при $n \leq 1\,300$ мин⁻¹ и индукции магнитного поля $B = 0,6...0,7$ Тл.

Концентрация магнитных наночастиц оказывает немонотонное влияние на противоизносные и противозадирные свойства. На четырехшариковой машине трения (ГОСТ 9490-75) показано, что смазочные композиции на основе пластической смазки «Циатим-201» и масла Castrol с добавкой 0,1 % масс магнетита обладают наилучшими характеристиками: диаметр пятна износа минимален ($d = 0,45$ мм против 0,65 мм для базовой смазки), нагрузка сваривания и критическая нагрузка максимальны [9]. При увеличении содержания магнетита до 0,5...1,0 % масс. противоизносные свойства ухудшаются (d возрастает до 0,72 мм), что объясняется абразивным действием агрегированных наночастиц и ростом внутреннего трения в смазочном слое. Таким образом, существует оптимальный диапазон концентраций (0,05...0,2 % масс.), обеспечивающий баланс между магнитным удержанием и сдвиговыми характеристиками.

Важным аспектом является выбор материалов пар трения для магнитожидкостных подшипников. Авторы работы [2] рассмотрели рациональный выбор материалов для подшипников скольжения горнодобывающего оборудования, смазываемых нанодисперсным магнитным маслом. Исследованы полимерные покрытия (на основе полиамида ПА-6, политетрафторэтилена ПТФЭ), керамические слои, полученные методом микродугового оксидирования (МДО) на алюминии и титане, а также аморфные композиционные покрытия из сплавов на основе железа и никеля. Показано, что правильный выбор материала в сочетании с магнитной смазкой позволяет существенно повысить износостойкость и ресурс подшипниковых узлов. Например, пара трения «закаленная сталь 45 – МДО-покрытие на Al» при смазке МСЖ демонстрирует в 3...5 раз меньшую интенсивность изнашивания, чем при смазке обычным индустриальным маслом И-20. Специфической проблемой является работа подшипника при высоких нагрузках или малых скоростях вращения вала (режим пуска или останова), когда толщина смазочной пленки h становится сравнимой с высотой неровностей (менее 1 мкм), а граничное трение – доминирующим. В отличие от традиционных подшипников, в магнитожидкостных подшипниках магнитное поле удерживает значительный объем смазки в зоне контакта, что замедляет выдавливание и снижает негативные последствия граничного трения. Сравнительные

эксплуатационные испытания модернизированного и стандартного подшипниковых узлов вала отбора мощности трактора «Беларус-826» (аналог нагруженного узла горной машины) свидетельствуют о повышении наработки на отказ в 1,6 раза [10].

ПРИМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Магнитожидкостные подшипники скольжения. Исследованиями [1, 2] установлено, что подшипники скольжения буровых установок и дробилок при переходе на МСЖ работают в гидродинамическом режиме в более широком диапазоне нагрузок по сравнению с обычным маслом. Основное достоинство магнитожидкостных подшипников заключается в том, что в широком нагрузочно-скоростном режиме они работают автономно в гидродинамическом режиме смазки за счет самоорганизующегося в магнитном поле замкнутого цикла поступления масла в зону трения. Рациональный выбор материалов пары трения (например, закаленная сталь – полимерное покрытие с магнитными свойствами) увеличивает ресурс в 1,5...2 раза.

Герметизация и смазка роликов шахтных конвейеров. Наиболее полные экспериментальные данные получены китайскими исследователями [3, 4] для роликов ленточных конвейеров, работающих под землей. В стандартной конструкции ролика используются лабиринтные уплотнения, которые быстро забиваются пылью и пропускают воду. Предложена замена на магнитожидкостное уплотнение с аксиально-радиальным распределением полюсов. Испытания, проведенные в условиях имитации угольной пыли и водно-шламовой среды, показали, что в обычных условиях (фиксированная скорость ленты) максимальное снижение вращательного сопротивления достигло 73 %, а среднее значение составило 54 %; в условиях имитации шахтной пыли вращательное сопротивление ролика с МСЖ было на 26 % ниже, чем у обычного ролика; после 24-часового воздействия угольным шламом и водой вращательное сопротивление обычного ролика возросло в 7 раз, в то время как у ролика с магнитной герметизацией оно практически не изменилось. Эти данные обобщены в табл. 1.

Таблица 1. Снижение вращательного сопротивления ролика конвейера при использовании магнитной смазочно-уплотнительной жидкости (по данным [3, 4])

Условия испытания	Традиционный ролик	Ролик с МСЖ	Относительное изменение, %
Обычные (фиксированная нагрузка)	1,35 Н · м	1,12 Н · м	–17 (средн.)
Обычные (фиксированная скорость)	–	–	–73 (макс.)
Имитация угольной пыли	1,58 Н · м	1,17 Н · м	–26
После 24 часов в угольном шламе + вода	9,45 Н · м (рост в 7 раз)	1,38 Н · м (без изменений)	–85

Уплотнения валов и крупнозазорные конструкции. Для горного оборудования характерны большие диаметры валов (до 300 мм) и технологические зазоры до 0,5...0,8 мм из-за вибраций и неточностей сборки. Классические магнитожидкостные герметизаторы рассчитаны на зазор $\leq 0,3$ мм [6]. Решением является крупнозазорное уплотнение с чередующимися аксиальными и радиальными

магнитными элементами [4]. При зазоре 0,6 мм такое уплотнение удерживает перепад давления до 0,3 МПа, а вращательное сопротивление на 16...34 % ниже, чем у лабиринтного уплотнения.

Буровые смазки и герметизация шарошечных долот. При шарошечном бурении твердых пород породная мелочь через зазор между шарошкой и лапой проникает в полость подшипников, вызывая зашламовывание и заклинивание. В работе [5] предложено использование МСЖ с низким коэффициентом трения (добавки дисульфида молибдена или графита к магнитной жидкости). Магнитное поле, создаваемое постоянными магнитами, вмонтированными в лапу, удерживает смазку в зазоре, одновременно выталкивая абразивные частицы. Патент РФ № 2338940 [7] описывает способ заправки таких систем под давлением, что повышает надежность пусков.

Уплотнение подшипников главных вентиляторов шахт. Главные вентиляционные установки шахт работают в условиях запыленного и агрессивного воздушного потока, содержащего угольную пыль, метан, сероводород и водяные пары. Традиционные лабиринтные и манжетные уплотнения подшипниковых узлов вентиляторов не обеспечивают полной герметичности, что приводит к попаданию абразива и влаги, снижению ресурса и внезапным отказам. Эффективным решением является применение магнитожидкостных уплотнений, которые создают практически герметичный барьер. Однако при работе магнитожидкостного уплотнения возможно гидродинамическое смешивание уплотняемой среды с магнитной жидкостью, что со временем может привести к потере герметизирующих свойств. Для устранения этого недостатка предложена комбинированная конструкция, в которой магнитожидкостное уплотнение устанавливается последовательно с манжетным уплотнением с пружинным поджатием. Такая гибридная схема позволяет компенсировать недостатки каждого из типов уплотнений и обеспечивает длительную надежную работу подшипниковых узлов главных вентиляторов шахт [23].

Смазка зубчатых передач редукторов горных машин. Перспективным направлением является использование МСЖ для смазки зубчатых передач редукторов горных машин (экскаваторов, дробилок, конвейерных приводов). Как отмечено в работах Института машиноведения РАН [13], воздействие градиентных магнитных полей на магнитоуправляемые смазочные материалы обеспечивает их целенаправленное перемещение и удержание в контакте поверхностей трения зубчатых передач, подшипниковых и уплотнительных конструкций. Разработанные составы МСЖ с намагниченностью насыщения 20...40 кА/м и термостабильностью до 340...378 °С могут применяться в высоконагруженных редукторах.

Магнитная сепарация полезных ископаемых. Магнитожидкостная сепарация основана на регулировании эффективной плотности магнитной жидкости под действием неоднородного магнитного поля, что позволяет разделять материалы с близкими плотностями, которые не разделяются традиционными методами (например, алмазы и сопутствующие минералы). Патент РФ № 2069101 описывает конструкцию магнитогидростатического сепаратора для переработки руд и вторсырья из сплавов цветных и черных металлов. В патенте РФ № 2152259 предложен способ магнитогравитационной сепарации мелкого материала крупностью менее 1 мм с использованием ферромагнитной жидкости на керосиновой основе.

Магнитофлотация руд благородных и цветных металлов. В традиционной флотации тяжелые немагнитные минералы (вольфрам, молибден, золото, свинец с плотностью $>5 \text{ г/см}^3$) плохо гидрофобизируются и всплывают в пене с эффективностью 70...85 %, что приводит к потерям в хвостах. Магнитные жидкости решают эту проблему: в высокоградиентном магнитном поле ($\nabla H = 10^4 \dots 10^6 \text{ А/м}^2$), создаваемом

ферромагнитными матрицами, наночастицы магнетита притягиваются к полюсам, локально увеличивая плотность и вязкость пенной фазы на 20...50 %. Это усиливает подъем тяжелых агрегатов «минерал – магнитная жидкость – пенообразователь». В классических работах М.И. Шлиомиса (ИФМ УрО РАН, 1974 [14]) и его последователей на обогатительных фабриках Урала показано: для золотосодержащих руд при объемной доле магнитной жидкости $\phi = 0,08$ и напряженности магнитного поля $H = 0,15$ Тл извлечение Au достигает 92...97 % против 75...82 % без магнитной жидкости; для вольфрамовых руд содержание WO_3 в концентрате возрастает на 12...15 % по массе; энергозатраты на сепарацию снижаются на 15...25 % за счет меньшего расхода реагентов. Аналогичные тесты в Китае (Институт угольной химии, 2010-е гг.) подтвердили эффективность метода для угольных шламов.

Применение МСЖ в качестве смазочно-охлаждающих жидкостей для режущего и абразивного инструмента. При скоростях резания 100...300 м/мин и контактных давлениях $p = 5...20$ МПа обычные смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) вытекают из зоны контакта из-за центробежных сил, вызывая перегрев (температура в зоне резания 200...400 °С) и интенсивный износ (0,5...1,5 мм/ч). Магнитная смазочная жидкость удерживается в зазоре 0,1...0,5 мм магнитным полем ($H = 0,1...0,3$ Тл, создаваемым постоянными NdFeB-магнитами, встроенными в корпус инструмента), повышает смачиваемость поверхности на 25...35 % и активирует магнитострикцию, что приводит к микровибрациям, разрушающим адгезионные связи стружки. Испытания, проведенные в Московском авиационном институте (2005...2010 гг.) на фрезерных и токарных станках с моделированием режимов проходческого щита 1ГПКС, показали: коэффициент трения $\mu = 0,08...0,12$ (против 0,14...0,18 для минерального масла); износ режущей кромки 0,2...0,4 мм/ч (снижение на 50...70 %); ресурс фрезы увеличивается на 200–300 %; температура в зоне резания снижается до 120...150 °С (против 250 °С). Опытное внедрение на рудниках Норильского никеля (2015 г.) для буровых долот показало снижение износа на 25...30 % при бурении кварцитов.

Магнитная обработка эмульсий и гидроразрыв пласта. Дополнительными направлениями применения МСЖ в горной и нефтегазовой отрасли являются:

а) деэмульсация нефтешламов – магнитная обработка водонефтяных эмульсий ускоряет их разрушение на 20...30 % за счет коалесценции капель в магнитном поле [12];

б) гидроразрыв пласта – по работам Института горного дела СО РАН (Красноярск, 1990-е г.), нагнетание МСЖ в пласт под контролем градиента магнитного поля позволяет создавать направленные трещины в массиве, повышая нефтеотдачу на 5...10 %.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ И ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ

Перспективные направления применения. На основе обобщения литературных данных выделены наиболее перспективные направления для дальнейших исследований и опытно-промышленных испытаний, которые систематизированы в табл. 2.

Таблица 2. Перспективные направления применения МСЖ в горном деле

Направление	Ожидаемый эффект	Технические барьеры
Магнитожидкостные подшипники скольжения	Увеличение ресурса в 1,5...2 раза	Герметизация магнитной системы от абразива
Крупнозачерпывающие уплотнения валов	Работа при зазорах до 0,8 мм	Усложнение конструкции, стоимость магнитов
Ролики ленточных конвейеров	Снижение энергопотребления на 17...73 %	Адаптация к отрицательным температурам
Гибридные системы «смазка + герметизация» для долот	Предотвращение зашламовывания опоры	Разработка термостойких МСЖ (до 200 °С)
Магнитореологические демпферы	Адаптивное гашение колебаний	Сложность управления полем в реальном времени
Смазка зубчатых передач редукторов	Снижение износа зубьев, уменьшение потерь	Удержание МСЖ на быстро вращающихся колесах
Магнитная сепарация и магнитофлотация	Повышение извлечения золота на 10...22 % и содержания вольфрама в концентрате на 12...15 %	Стоимость феррожидкости, ее регенерация
МСЖ как СОЖ для режущего инструмента	Снижение износа на 50...70 %, рост ресурса в 2...3 раза	Встраивание магнитных систем в инструмент
Деэмульсация и гидроразрыв	Ускорение разделения фаз на 20...30 %, повышение нефтеотдачи на 5...10 %	Обеспечение однородности поля в пластовых условиях

Одним из экологически значимых направлений является создание магнитореологических жидкостей (MRF) из отходов горного производства. В отличие от синтеза на основе чистых реагентов, эта технология позволяет утилизировать техногенные хвосты и получать функциональную «умную» жидкость. Первые успешные эксперименты провели колумбийские ученые [24], которые использовали магнетитовый хвост обогащения, охарактеризованный методами рентгеновской дифракции (XRD) и энергодисперсионной спектроскопии (EDS), и получили стабильную MRF.

Результаты показали высокую эффективность такого подхода. Приложение внешнего магнитного поля напряженностью всего 0,12 Тл увеличило вязкость полученной MRF более чем на 400 %. Это сопоставимо с характеристиками жидкостей из чистых реагентов. Кроме того, управляя полем до 0,06 Тл, можно достичь значений вязкости (0,025...0,34 Па · с), типичных для масел, применяемых в горной технике [24]. Таким образом, доказана принципиальная возможность использования отходов обогащения для создания эффективных магнитореологических жидкостей.

Ограничения и пути их преодоления. Основными ограничениями остаются:

а) стоимость (коммерческие МСЖ стоят от 1 500 до 5 000 руб/кг, однако возможно их получение из промышленных отходов, снижающее цену в 2...3 раза);

б) температурный диапазон (многие МСЖ теряют стабильность выше 120 °С, но составы на фторорганике с высокотемпературными присадками работают до 378 °С [13]);

в) агломерация частиц при объемной доле $\phi > 0,2$ или $T > 120$ °С (ресурс падает в 3...5 раз);

г) чувствительность к загрязнениям (частицы пыли размером >1 мкм снижают стабильность);

д) чувствительность к сильным внешним полям (при работе рядом с электромагнитами требуется экранирование).

Экономическая целесообразность подтверждается расчетами: для конвейерной линии длиной 1 000 м с 2 000 роликов замена на ролики с МСЖ окупается за 6...12 месяцев за счет снижения энергопотребления и сокращения ремонтов; для бурового инструмента снижение износа на 25...30 % дает экономический эффект 15...40 % по ресурсу оборудования.

Прогноз развития рынка и технологий. Согласно данным аналитических агентств, глобальный рынок магнитореологических жидкостей в 2024 г. оценивался в 6,1 млрд долл. США и, по прогнозам, достигнет 38,2 млрд долл. к 2034 г. при среднегодовом темпе роста 20,1 %. Рынок магнитных жидкостей в 2024 году составил 0,5 млрд долл. и, по экспертным оценкам, к 2033 г. может достичь 1,2 млрд долл. при среднегодовом темпе роста 9,8 %. На основе анализа текущих трендов выделены следующие этапы развития применения МСЖ в горном деле.

1. Краткосрочный период (2026...2028 гг.): внедрение МСЖ в ролики ленточных конвейеров на опытных участках угольных шахт, разработка и испытания крупнозачерпных уплотнений для дробилок и грохотов, создание первых коммерческих образцов магнитожидкостных подшипников для буровых установок, опробование магнитофлотации на обогатительных фабриках.

2. Среднесрочный период (2029...2032 гг.): широкое промышленное внедрение МСЖ в конвейерные системы и буровое оборудование, разработка гибридных систем «смазка + герметизация» для тяжелых режимов эксплуатации, создание интеллектуальных систем мониторинга состояния МСЖ с обратной связью по магнитному полю, снижение стоимости МСЖ за счет использования отечественного сырья и методов регенерации.

3. Долгосрочный период (2033...2035 гг. и далее): полная замена традиционных смазок на МСЖ в критических узлах горного оборудования, создание адаптивных трибосистем с автоматическим регулированием смазочных свойств, развитие технологий магнитофлотации для переработки труднообогатимых руд, интеграция МСЖ в системы промышленного интернета вещей (IIoT) для предиктивного обслуживания, создание криогенных составов МСЖ (до -50 °С) для арктических месторождений и гибридных МСЖ с наноалмазами для сверхтвердых пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитные смазочные жидкости представляют собой термодинамически стабильные коллоидные системы, обладающие уникальным сочетанием свойств: способностью удерживаться в зазоре под действием магнитного поля (за счет пондеромоторных сил), сохранять смазочную способность в присутствии воды и абразива, а также работать в широком диапазоне нагрузок и температур.

Трибологические исследования показали, что оптимальная концентрация магнитных наночастиц в МСЖ, при которой достигается минимальный коэффициент трения и износ, составляет 0,05–0,2 % масс. Внешнее магнитное поле с индукцией 0,6–0,7 Тл и частотой вращения до 1 300 мин⁻¹ обеспечивает наименьший момент трения в уплотнениях. Правильный выбор материалов пар трения (например, МДО-покрытия) в сочетании с МСЖ позволяет увеличить ресурс в 1,6...2 раза.

Экспериментально доказано, что применение МСЖ в роликах шахтных конвейеров снижает вращательное сопротивление до 73 % в оптимальных режимах и сохраняет работоспособность после 24-часового воздействия угольного шлама (сопротивление не изменилось, тогда как у традиционного ролика оно выросло в 7 раз). Для горного оборудования с большими зазорами (0,5...0,8 мм) разработаны крупнозазорные магнитожидкостные уплотнения с аксиально-радиальным распределением полюсов, обеспечивающие перепад давления до 0,3 МПа.

Новыми перспективными направлениями являются:

магнитофлотация руд (извлечение золота повышается до 92...97 % против 75...82 %, для вольфрама – увеличение содержания в концентрате на 12...15 %);

применение МСЖ в качестве СОЖ для режущего инструмента (снижение износа на 50...70 %, рост ресурса фрезы на 200...300 %);

магнитная обработка эмульсий (ускорение деэмульсации на 20...30 %) и гидроразрыв пласта (повышение нефтеотдачи на 5...10 %).

Мировой рынок демонстрирует устойчивый рост CAGR (9,8...20 %), что свидетельствует о высоком промышленном интересе к МСЖ. Прогнозируется, что к 2035 году они займут значительную долю в системах смазки, уплотнения и обогащения горного оборудования. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку дешевых термостойких составов МСЖ на основе отечественного сырья (в том числе из промышленных отходов), создание конструкторских рекомендаций по встраиванию магнитных систем в серийное горное оборудование, разработку криогенных и гибридных (с наноалмазами) составов, а также на создание интеллектуальных систем мониторинга состояния МСЖ с обратной связью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горлов И.В., Болотов А.Н., Зюзин Б.Ф. Магнитожидкостные подшипники горнодобывающего оборудования // *Наука и техника*. 2012. № 6. С. 17–23.
2. Болотов А.Н., Горлов И.В., Новикова О.О., Васильев М.В. Триботехнические материалы для магнитожидкостных подшипников горнодобывающего оборудования // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 12. С. 121–126.
3. Zhao S., Bao J., Xu H., Yin Y., Xie H., Liu T. Magnetic Fluid Lubrication and Sealing Performance of Mining Belt Conveyor Roller // *Journal of Mechanical Engineering*. 2021. V. 57. № 21. P. 211–219.
4. Cao J., Bao J., Yin Y., Liu C., Wang X., Yang J. Design and experiment of a large gap rotating seal structure based on nanomagnetic liquid // *Industrial Lubrication and Tribology*. 2025. V. 77. № 3. P. 400–408.
5. Дударенко И.В., Фалина А.С. Разработка буровой смазки с использованием магнитной жидкости / *XI Международный конкурс научно-исследовательских и творческих работ учащихся «Старт в науке»: Сб. статей*. М., 2023. С. 45–49. URL: <https://school-science.ru> (дата обращения: 13.04.2026).
6. Магнитожидкостные герметизаторы (МЖГ) // *Применение магнитных материалов* / под ред. В.В. Шевченко. М.: Машиностроение, 2018. С. 212–220.
7. Патент РФ № 2338940. Способ заправки магнитожидкостных систем герметизации под давлением / Перминова С.М., Власенко В.Ф. Заявл. 25.12.2006. Опубл. 20.11.2008, Бюл. № 32.
8. Болотов А.Н., Новикова О.О., Раткевич Е.А. Современные исследования магнитных смазочных материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 1 (29). С. 34–41.

9. Задошенко Е.Г., Бурлакова В.Э. Изучение влияния ферромагнитных наночастиц на триботехнические характеристики смазок // *Вестник Донского государственного университета*. 2015. № 1 (80). С. 85–92.
10. Терентьев В.В., Баусов А.М., Торопов М.В. Исследование трения в магнитожидкостном уплотнении // *Наука и образование*. 2021. № 3. С. 14–22.
11. Магнитные и электрические методы обогащения: учебник / под ред. В.В. Клюева. М.: Недра, 1981. 240 с.
12. Голубев И.А., Голубев А.В., Лаптев А.Б. Практика применения аппаратов магнитной обработки для интенсификации процессов первичной подготовки нефти // *Записки горного института*. 2020. Т. 245. С. 554–560.
13. Магнитоуправляемые смазочные материалы (МСМ) с наноразмерной феррофазой и повышенной термостабильностью // ИМАШ РАН. URL: <http://mecheng.imash.ru/magnitouppravlyaemye-smazochnye-materialy> (дата обращения: 13.04.2026).
14. Шлиомис М.И. Магнитные жидкости // *Успехи физических наук*. 1974. Т. 112. № 3. С. 427–452.
15. Huang W., Shen C., Liao S., Wang X. Study on the Ferrofluid Lubrication with an External Magnetic Field // *Tribology Letters*. 2011. V. 41. P. 145–151.
16. Huang W., Wu W.B. Tribological properties of magnetic surface lubricated by ferrofluids // *The European Physical Journal – Applied Physics*. 2012. V. 60. № 2. P. 20402.
17. Братухин Ю.К., Шлиомис М.И. Гидромеханика магнитных жидкостей: монография. М.: Наука, 1990. 288 с.
18. Шауро А.Н., Берлин М.А., Грабовский Ю.П. Некоторые проблемы дальнейшего развития технологий получения и применения магнитных жидкостей / *Экспозиция Нефть Газ: Тезисы докладов научно-практической конференции*. Красноярск: ИГД СО РАН, 1995. С. 56–62.
19. Патент РФ № 2152259. *Способ магнитогравитационной сепарации* / Евтушенко М.Б., Тиунов А.А. Заявл. 04.06.1999. Оpubл. 10.07.2000. Бюл. № 19.
20. Патент РФ № 2069101. *Способ разделения материалов в ферромагнитной жидкости и магнитогидростатический сепаратор* / Ермаков В.В., Пугачев В.С., Лопатков А.К., Евтушенко М.Б., Путов Б.А. Заявл. 16.09.1994. Оpubл. 20.11.1996, Бюл. № 27.
21. Global Magnetorheological Fluid Market Size & Share 2025-203 // GM Insights. URL: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/magnetorheological-fluid-market> (дата обращения: 13.04.2026).
22. Magnetorheological Fluid and Ferrofluids Market // Verified Market Reports. URL: <https://www.verifiedmarketreports.com/product/magnetorheological-fluid-ferrofluids-market> (дата обращения: 13.04.2026).
23. Радионов А. Магнитогидродинамические уплотнительные комплексы для подшипниковых узлов главных вентиляторов шахт // *Магнитогидродинамика*. 2018. Т. 54. № 1-2. С. 109–114.
24. Quitian G., Saldarriaga W., Rojas N. Steady rheological properties of a magnetorheological fluid from mining waste // *Applied Physics A*. 2021. V. 127. № 2. P. 149.

Для цитирования: Болотов А.Н., Яблонев А.Л. Магнитные смазочные жидкости в горном деле: физико-химические основы, трибологические характеристики и перспективы применения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 3 (31). С. 73–85.

MAGNETIC LUBRICANTS IN MINING: PHYSICAL AND CHEMICAL PRINCIPLES, TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS AND APPLICATION PROSPECTS

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., A.L. YABLONEV, Dr. Sc.

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

Extreme operating conditions of mining equipment (abrasive dust, high humidity, shock and vibration loads, a wide temperature range) limit the service life of traditional lubricants and seals. This article presents an analytical review of the physicochemical, rheological, and tribological properties of magnetic lubricating fluids (MLFs) as a class of "smart" fluids and lubricants. Based on a critical analysis of the work of Russian and international authors, this article systematizes data on the influence of magnetite nanoparticle concentration, magnetic field parameters, and friction pair materials on the friction coefficient, wear, and load-bearing capacity of MLFs. The article summarizes the results of experimental tests of MLFs in magnetic fluid plain bearings, shaft seals, belt conveyor rollers, drilling tools, gearbox gears, as well as in magnetic separation processes, magnetoflotation, cutting fluids, and hydraulic fracturing. The tabular presentation presents quantitative indicators for reducing rotational resistance (up to 73 %), increasing water resistance (retaining properties after 24 hours in coal slurry), increasing service life (by 1,6...7 times), gold recovery during magnetic flotation (92...97 % versus 75...82 %), and reducing cutting tool wear (by 50...70 %). Key promising areas are identified: large-gap seals (up to 0,8 mm), hybrid "lubrication and sealing" systems, adaptive magnetorheological dampers, and intelligent monitoring systems for magnetic fluid condition. A forecast for technology development through 2035 is provided.

Keywords: magnetic fluid, ferrofluid, tribological properties, magnetic fluid bearing, magnetic fluid seal, belt conveyor, roller bit, magnetoflotation, cutting fluid, magnetite nanoparticles.

Поступила в редакцию/received: 24.04.2026; после рецензирования/revised: 27.04.2026;
принята/accepted: 30.04.2026

УДК 622. 23.05

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-85-90

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОГО ПОТОКА ПРИ УСТРАНЕНИИ ЗАСОРА В ТРУБАХ-МОСТАХ ПРИ ДОБЫЧЕ ТОРФЯНОГО СЫРЬЯ

Д.М. ЩЕРБАКОВА, канд. техн. наук, Л.В. ЛОБАЧЕВА, канд. техн. наук

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

© Щербакова Д.М., Лобачева Л.В., 2026

Статья посвящена исследованию истечения загрязненного потока при устранении засора в трубах-мостах, используемых при добыче торфяного сырья. Засорение трубопроводов (илом, древесными и торфяными остатками) приводит к

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (31), 2026*

подпору воды в картовых каналах и снижению эффективности добычи. Изучено изменение гидравлических параметров (давления, скорости, расхода) потока при гидродинамической прочистке, оценена эффективность метода. Для этого создана лабораторная установка, моделирующая процесс истечения. Применены законы гидравлики для напорных трубопроводов, выполнены гидравлические расчеты по уравнению Бернулли, проведен анализ экспериментальных данных. Выявлена зависимость давления на выходе от плотности потока и конфигурации сечения, а также подтверждено влияние местных сопротивлений. Разработаны рекомендации по оптимизации обслуживания труб-мостов для повышения надежности осушительных систем.

Ключевые слова: добыча торфяного сырья, трубы-мосты, загрязненная масса, траншея, уравнение Д. Бернулли, выходное сечение, напорный трубопровод.

ВВЕДЕНИЕ

При добыче торфяного сырья применяют трубы-мосты, служащие для свободного прохода воды и отвода влаги из картовой сети в валовую. Данная конструкция представляет собой сеть из трубопроводов, засыпанных в траншею в результате завершающего этапа подземной прокладки инженерной коммуникации. При эксплуатации система частично или полностью загрязняется илом, древесными остатками, что приводит к подпору воды в картовых каналах. Поднятие уровня грунтовых вод практически до поверхности усложняет работу торфяных машин и увеличивает время сушки в полевых условиях [1, 2].

Прочистку трубопроводов осуществляют специальными машинами, у которых в качестве рабочего органа могут использоваться гидровибрационная головка (машина ПТМ-1), гидравлическая пробка или шланг со стрелой (ПТМ БГ2, МТП-34 – прицепные машины к трактору МТЗ-1021). Более популярны машины с гидродинамическим принципом работы. Гидравлическая пробка с резиновой камерой прикреплена к металлическому основанию. К пробке присоединен шланг, по которому под давлением подается вода (рис. 1) [3].



Рис. 1. Машина ПТМ БГ-2 прицепная к трактору МТЗ-1021

Принцип действия машины заключается в создании избыточного давления потока воды, направленного на засор [1]. При соприкосновении потока воды с поверхностью засора возникает гидравлический удар, сопровождающийся резким повышением давления и заставляющий загрязненную массу перемещаться внутри трубопровода до выхода в окружающую среду. После соприкосновения вода и масса частично смешиваются, что делает засор менее плотным. Загрязненный поток перемещается внутри трубопровода в виде жидкой суспензии. Засор может частично или полностью перекрывать живое сечение трубопровода [4]. В момент удара потока воды требуется передать засору давление, необходимое для преодоления сил

сопротивления между стенками трубопровода и засором (рис. 2). Поскольку на выходе из трубопровода наблюдается внешнее изменение гидравлических параметров потока, можно предположить различие параметров на входе и выходе из живого сечения трубопровода.

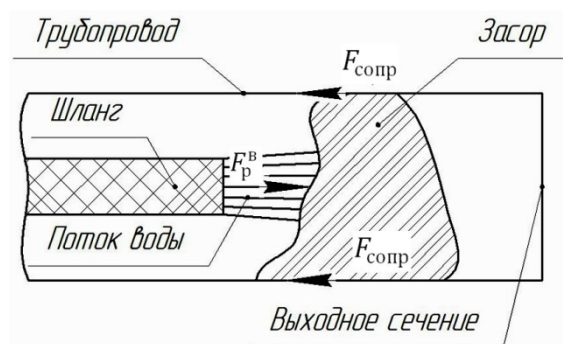


Рис. 2. Момент соприкосновения потока воды и засора внутри трубопровода при полном перекрытии живого сечения. $F_{сопр}$ – сила сопротивления между потоком воды и внутренней поверхностью трубопровода, $F_p^в$ – сила давления потока воды

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования давления и скорости на входе и выходе из выходного сечения трубопровода сконструирована лабораторная установка, состоящая из жесткого напорного трубопровода постоянного сечения 1, расходомера 2, видео- и фотокамеры 3, белого матового пластикового щита 4, лампы 5; в качестве рабочей жидкости взята вода (рис. 3).

Жесткий напорный трубопровод установлен между пластиковым щитом и лампой таким образом, чтобы тень от него, падающая на щит, имела действительное изображение. Для измерения расхода воды на трубопроводе установлен объемный расходомер. Рядом с лампой закреплена видео- и фотокамера для фиксации момента истечения жидкости из выходного сечения в окружающую среду и изображении тени на белом щите. Многократный опыт позволил получить изображения профилей потока жидкости на выходе из выходного сечения трубопровода.

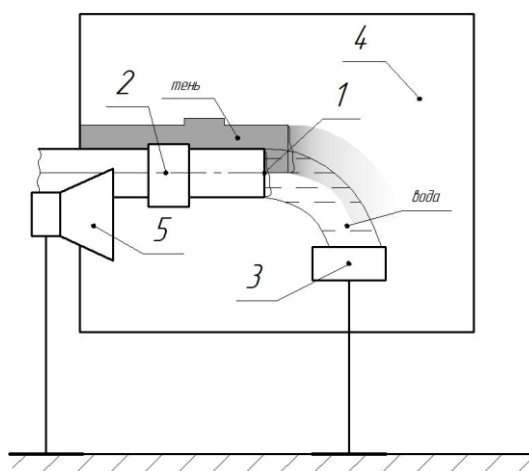


Рис. 3. Схема лабораторной установки

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим два живых сечения, расположенных перед выходным сечением трубопровода и сразу после него. Через центр живого сечения O проведем плоскость сравнения $O-O$ и прямоугольную координатную плоскость XOY (рис. 4). В момент истечения жидкости из выходного сечения струя воды на границе с газом имеет форму с неровными краями, что свидетельствует о неравномерном распределении давления внутри потока или местных скоростей.

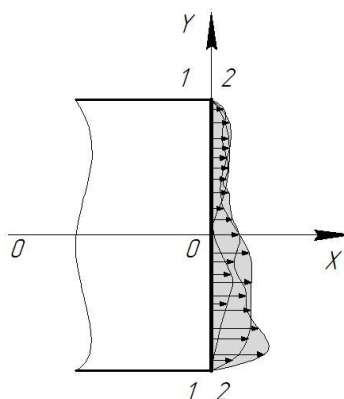


Рис. 4. Продольный профиль потока жидкости на выходе из трубопровода

Для заданных сечений составим уравнение Д. Бернулли для напорного потока элементарной струйки реальной жидкости и выразим его через среднюю скорость v потока и коэффициент Кориолиса α [5].

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_{w1-2}, \quad (1)$$

где z_1 и z_2 – координаты центра тяжести живых сечений; p_1 и p_2 – давление перед выходным сечением и сразу после него; v_1 и v_2 – средние скорости потока жидкости живых сечений; h_{w1-2} – суммарные потери напора; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

Координаты центра тяжести расположены на плоскости сравнения $z_1 = z_2$. Расстояние между живыми сечениями крайне мало: $dl \approx 0$, поэтому потерями напора по длине можно пренебречь. Трубопровод постоянного сечения $S_1 = S_2$, расход жидкости на входе и выходе сечения постоянный: $Q = \text{const}$. Согласно уравнению неразрывности потока, $Q = S_1 v_1 = S_2 v_2$ [5]. С учетом вышесказанного получим $v_1 = v_2$, тогда уравнение Д. Бернулли примет вид

$$\frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_2}{\rho g} + h_m, \quad (2)$$

где h_m – потери напора на местных сопротивлениях.

Домножим левую и правую части уравнения (2) на ρg :

$$p_1 = p_2 + h_m \rho g; \quad (3)$$

$$p_2 = p_1 - h_m \rho g, \quad (4)$$

следовательно, давление на входе и выходе из выходного сечения трубопровода зависит от плотности потока жидкости, конфигурации живого сечения.

Однако на струю жидкости в момент ее истечения действуют атмосферное давление и массовые силы (рис. 5). Сила давления F_p , действующая на живое сечение по оси OY :

$$F_p = p_{атм} dL + F, \quad (5)$$

где dL – площадь поверхности живого сечения по оси OY .

По оси OX сила давления $F_{p_2} = s_2 p_2$. Определим равнодействующую силу давления F в центре живого сечения:

$$F = \sqrt{F_{p_2}^2 + F_p^2}. \quad (6)$$

Исходя из выражения (6), утверждения об отсутствии давления на выходе и переходе потенциальной энергии жидкости в кинетическую энергию движения нерациональны.

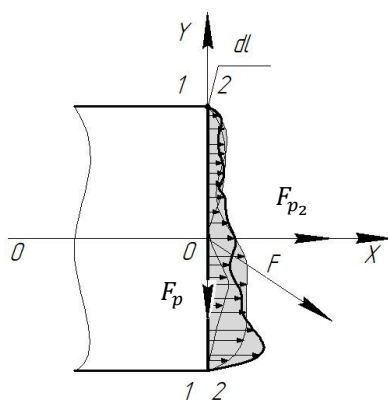


Рис. 5. Силы, действующие на поток жидкости в момент его истечения из выходного отверстия в трубопроводе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования изучены особенности истечения загрязненного потока при устранении засора в трубах-мостах, используемых при добыче торфяного сырья. Эксперименты на лабораторной установке позволили:

измерить давление и скорость потока на входе и выходе из трубопровода при различных степенях засорения;

подтвердить применимость уравнения Бернулли для анализа гидравлических параметров потока в условиях прочистки;

выявить зависимость давления на выходе из трубопровода от плотности потока жидкости и конфигурации живого сечения;

оценить влияние местных сопротивлений на изменение гидравлических характеристик потока.

Установлено, что гидродинамический метод прочистки эффективен для устранения засоров, состоящих из торфяных частиц, ила и древесных остатков. При создании избыточного давления и гидравлическом ударе загрязняющая масса переходит в состояние жидкой суспензии и выводится из трубы.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для разработки более эффективных методов прочистки труб-мостов, оптимизации графика обслуживания сооружений на торфяных месторождениях, проектирования новых конструкций труб-мостов с учетом минимизации риска засора, снижения затрат на эксплуатацию торфяных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазарев А.В., Корчунов С.С., Малков Л.М. [и др.]. Справочник по торфу. М.: Недра, 1982. 760 с.
2. Мякотных А.А., Иванова П.В., Иванов С.Л. Традиционные и перспективные способы добычи торфяного сырья // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2021. № 13. С. 37–41.
3. Машина для прочистки трубчатых мостов и тушения очагов возгорания. URL: <https://www.berezinskoe.by/proizvodstvo-mashin-ptm-bg-2/> (дата обращения: 07.05.2026).
4. Патент СССР 246477. *Машина для прочистки трубчатых мостов через картовые канавы на полях добычи фрезерного торфа* // Попсуев В.Е., Вендигов И.В., Акулич В.А., Тановицкий И.Г., Лукьянов А.Д., Пурис Б.И. Заявл. 17.05.1965. Опубл. 20.06.1969, Бюл. № 21.
5. Чугаев Р.Р. Гидравлика (техническая механика жидкости): учебник. 4-е изд. М.: Бастет, 2013. 671 с.

Для цитирования: Щербакова Д.М., Лобачева Л.В. Исследование истечения загрязненного потока при устранении засора в трубах-мостах при добыче торфяного сырья // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 3 (31). С. 85–90.

STUDY OF CONTAMINATED FLOW DISCHARGE DURING CLEARING BLOCKAGES IN PIPE-BRIDGES USED IN PEAT RAW MATERIAL EXTRACTION

D.M. SHCHERBAKOVA, Cand. Sc., L.V. LOBACHEVA, Cand. Sc.

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

The article is devoted to the study of contaminated flow discharge during the clearance of blockages in pipe-bridges used in peat raw material extraction. Blockages in pipelines (caused by silt, wood debris, and peat residues) lead to water backup in cart channels and reduced extraction efficiency. The study examines changes in hydraulic parameters (pressure, velocity, flow rate) during hydrodynamic cleaning and evaluates the method's effectiveness. For this purpose, a laboratory setup was created to simulate the discharge process. The principles of hydraulics for pressurized pipelines were applied, including hydraulic calculations using the Bernoulli equation and analysis of experimental data. The research revealed a dependence of outlet pressure on flow density and cross-section configuration, and confirmed the influence of local resistances. Recommendations have been developed to optimize the maintenance of pipe-bridges, aiming to improve the reliability of drainage systems.

Keywords: peat raw material extraction, pipe-bridges, contaminated mass, trench, Bernoulli's equation, outlet cross-section, pressurized pipeline.

Поступила в редакцию/received: 25.05.2026; после рецензирования/revised: 07.06.2026; принята/accepted: 12.06.2026

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (31), 2026*

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 519.8

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-91-96

АЛГОРИТМ ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА БЕСКОНЕЧНОМ ГОРИЗОНТЕ

О.Д. БЕЛОВА, магистрант, Ю.Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук

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

© Белова О.Д., Матвеев Ю.Н., 2026

В статье рассмотрена задача поиска приближенного решения оптимального управления на бесконечном горизонте с использованием синтеза оптимального закона управления с обратной связью для динамических систем. Предложена схема последовательных редукций, позволяющая перейти от непрерывной постановки задачи к конечномерной дискретной модели. Для решения полученной системы уравнений динамического программирования применен метод последовательных приближений.

Ключевые слова: оптимальное управление, синтез обратной связи, динамическое программирование, уравнение Беллмана, метод последовательных приближений, дискретизация.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из основных задач оптимального управления состоит в удержании систем в некоторой окрестности заданного состояния на бесконечном времени [1]. Такой способ мы будем называть задачей с бесконечным горизонтом. Практические потребности оптимального управления требуют, чтобы решение упомянутой задачи искалось в виде закона управления с обратной связью.

Прямое решение задачи синтеза обратной связи обладает огромными вычислительными трудностями. Поэтому целью настоящей работы является разработка [2, 3] алгоритма приближенного решения упомянутой задачи. Алгоритм основан на построении цепочки, позволяющей перейти от непрерывной задачи синтеза к алгоритмически реализуемому поиску закона управления с обратной связью.

ПОСТАНОВКА ИСХОДНОЙ ЗАДАЧИ

Пусть X – это пространство состояний некоторой динамической системы, U – пространство управлений. Будем считать, что X и U – полные нормированные пространства над телом действительных чисел $\mathbf{R}$.

Предположим, что эволюция состояний системы характеризуется дифференциальным уравнением

$$\frac{dx}{dt} = g(x, u), \quad (1)$$

где $g: X \times U \rightarrow X$ – липшицева по совокупности переменных функция. Будем считать, что начальное состояние задано:

$$x(0) = c.$$

Задача оптимального управления [1] состоит в том, что мы должны отыскать закон управления с обратной связью:

$$u(t) = \pi(x(t)), t \geq 0,$$

такой, что

$$g(u) = \int_0^{+\infty} h(x(t), u(t)) dt \rightarrow \inf, \quad (2)$$

где $\pi: X \rightarrow U$ и $h: X \times U \rightarrow R$ – липшицевы по совокупности переменных функции. Интеграл в выражении (2) должен сходиться, поэтому необходимо выполнение условия

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \|h(x(t), u(t))\| = 0. \quad (3)$$

Условие сходимости является фундаментальным требованием корректности задачи: оно гарантирует, что суммарные накопленные затраты остаются конечными при $t \rightarrow \infty$. Это физически соответствует достижению системой устойчивого равновесия или целевого множества с затухающей динамикой.

Если условие (3) выполнено, то мы можем говорить следующее.

Утверждение 1. Если существует хотя бы один закон управления

$$u(t) = \pi(x(t)),$$

для которого

$$\left| \int_0^{+\infty} h(x(t), u(t)) \pi(x(t)) dt \right| < +\infty,$$

то решение задачи (1), (2) существует.

ПЕРВАЯ РЕДУКЦИЯ ЗАДАЧИ

Первая редукция задачи состоит в переходе от непрерывной модели динамики к ее дискретному аналогу.

Для задачи с дискретным временем уравнение (1) заменяется уравнением

$$x_{n+1} = x_n + g(x_n, u_n) \Delta t, \quad (4)$$

где Δt – шаг дискретизации по времени. Начальное состояние по-прежнему задано как

$$x(0) = c.$$

Закон управления тоже будет дискретным, а интеграл заменяется суммой. Тогда имеем

$$J_1(u) = \sum_{n=0}^{+\infty} h(x_n, u_n) \Delta t \rightarrow \inf. \quad (5)$$

Утверждение 2. Если существует хотя бы один закон управления

$$u_n = \hat{\pi}(x_n),$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$, для которого

$$\left| \sum_{n=0}^{+\infty} h(x_n, \hat{\pi}(x_n)) \right| < +\infty,$$

то решение задачи (4), (5) существует.

Для построения решения задачи можем применить динамического программирования [4], после чего задача превратится в задачу об отыскании функционального уравнения

$$f(c) = \inf [h(c, \pi(c)) \Delta t + f(c, c + g(c, \pi(c)) \Delta t)]. \quad (6)$$

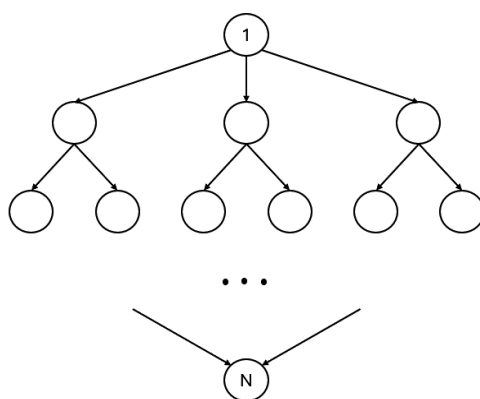
Таким образом, исходная задача оптимального управления упрощается до более простой задачи о построении решения уравнения (6) в банаховом пространстве.

ВТОРАЯ РЕДУКЦИЯ ЗАДАЧИ

Вторая редукция задачи направлена на преодоление вычислительных трудностей, возникающих при непосредственном решении уравнения Беллмана [4].

Применяемая фиксация конечного множества управлений позволяет интерпретировать задачу поиска оптимального закона управления как задачу обхода взвешенного ориентированного графа [5, 6]. Это означает, что задача синтеза управления трансформируется в задачу отыскания оптимального потока или стратегии перемещения по сети из начальной вершины в целевую [7, 8].

Применив некоторые управления, получим набор новых состояний. В итоге у нас появляется состояние N , которое мы считаем «хорошим», т.е. тем, что будет обеспечивать существование решения исходной задачи. В результате получается задача о минимизации потока на сети из состояния 1 в состояние N . Таким образом, мы генерируем сеть, где 1 – начальное состояние, а N – целевое (рисунок).



Образец сгенерированной сети

Утверждение 3. Если существует хотя бы один путь из вершины 1 в вершину N , то минимальный путь существует.

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ НА СЕТИ

Существует несколько альтернативных способов численного решения сформулированной дискретной задачи. Здесь мы отметим алгоритм Дейкстры [9] и алгоритм Беллмана [4]. Первый дает путь, но не закон управления [10]. Второй лишен этого недостатка. Поэтому мы будем применять алгоритм Беллмана, основанный на методе последовательных приближений.

Кроме того, будем пользоваться алгоритмом [4] по причине его хорошей сходимости.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Для практической проверки теоретических положений и оценки эффективности предложенного алгоритма было разработано приложение с интуитивно понятным графическим интерфейсом. Данное приложение реализует два альтернативных подхода [11, 12] к поиску оптимального пути: классический алгоритм Дейкстры [9] и модифицированный алгоритм [4] с применением метода последовательных приближений для решения системы уравнений динамического программирования.

В ходе вычислительного эксперимента рассматривался граф, содержащий 100 вершин и произвольное количество ребер с положительными весовыми коэффициентами, моделирующими время прохождения соответствующих участков пути. Цель эксперимента заключалась в нахождении оптимального маршрута из вершины 1 в вершину 100 с минимальными суммарными затратами.

Ключевым аспектом эксперимента является анализ вычислительной эффективности методов. Алгоритм [4] с использованием метода последовательных приближений показал следующие характеристики:

время выполнения: 2,06 мс;

количество итераций: 12;

проверок ребер: 3 302;

операций релаксации: 337.

Для сравнения, классический алгоритм Дейкстры продемонстрировал:

время выполнения: 4,25 мс;

количество обработанных вершин: 107;
проверок ребер: 254;
операций релаксации: 106.

Полученные результаты свидетельствуют о существенном преимуществе алгоритма [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм позволяет в некотором приближении получить алгоритм, пригодный для построения оценок оптимального управления с обратной связью в задачах слежения на бесконечном горизонте. Важной особенностью является то, что линейность управляемой системы не предполагается. Алгоритм дает удобную вычислительную процедуру, которая в некоторых случаях может оказаться эффективной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ли Э.Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. М.: Наука, 1972. 578 с.
2. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. 3-е изд. М.: Вильямс, 2013. 1328 с.
3. Ахо А., Хопкрофт Дж., Ульман Дж. Построение и анализ вычислительных алгоритмов. М.: Мир, 1979. 536 с.
4. Беллман Р., Каллаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. М.: Наука, 1969. 120 с.
5. Харари Ф. Теория графов. М.: Мир, 1973. 300 с.
6. Оре О. Теория графов. М.: Наука, 1980. 336 с.
7. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: Физматлит, 2012. 584 с.
8. Сысоев А.С., Ляпин С.А., Галкин А.В., Ризаева Ю.Н., Кадасев Д.А., Хабибуллина Е.Л. Интеллектуальные методы управления транспортными системами: монография, 2-е изд. М.: Дашков и К, 2022. 192 с.
9. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs // *Numerische Mathematik*. 1959. V. 1. P. 269–271.
10. Silva T.K.D.S., Resende M.G.C., Pardalos P.M., Filho J.C.M. Dijkstra-based algorithms for shortest path with negative edges // *Journal of the Operations Research Society of Japan*. 2013. V. 56. № 2. P. 103–118.
11. Moura M.A.C., Machado R.C.S., Carvalho L.H.V. Shortest paths on dynamic graphs: a survey. 2017. arXiv:1705.02044. 45 p. URL: <https://arxiv.org/abs/1705.02044> (дата обращения: 10.03.2026).
12. AbuSalim S.W., Ibrahim R., Zainuri Saringat M., Jamel S., Abdul Wahab J. Comparative analysis between dijkstra and bellman-ford algorithms in shortest path optimization // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 917. № 1. P. 012077.

Для цитирования: Белова О.Д., Матвеев Ю.Н. Алгоритм приближенного решения задачи оптимального управления на бесконечном горизонте // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 3 (31). С. 91–96.

ALGORITHM FOR THE APPROXIMATE SOLUTION OF OPTIMAL CONTROL ON AN INFINITE HORIZON

O.D. BELOVA, Magister, Yu.N. MATVEEV, Dr. Sc.

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

The article addresses the problem of finding an approximate solution to the optimal control problem over an infinite horizon through the synthesis of an optimal feedback control law for dynamical systems. A sequential reduction scheme is proposed to transition from a continuous problem formulation to a finite-dimensional discrete model. The method of successive approximations is applied to solve the resulting system of dynamic programming equations.

Keywords: optimal control; feedback control synthesis; dynamic programming; Bellman equation; method of successive approximations; discretization.

Поступила в редакцию/received: 18.05.2026; после рецензирования/revised: 20.05.2026;
принята/accepted: 26.05.2026

УДК 004.942

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-96-102

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ЧАСТИЧНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ОЦЕНКИ ТРУДОЗАТРАТ В ИТ-ПРОЕКТАХ

Р.А. ЛУКЬЯНОВ, асп., К.А. КАРЕЛЬСКАЯ, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: rlukyanov12@yandex.ru

© Лукьянов Р.А., Карельская К.А., 2026

Статья посвящена исследованию потенциала применения регрессионных моделей в контексте итеративно-инкрементальной методологии управления ИТ-проектами. Раскрыты теоретические основы и методологические подходы, лежащие в основе данного направления, а также проанализирован практический опыт настройки и разработки регрессионных моделей. Рассмотрена их эффективность при оценке трудозатрат и планировании ресурсов в сфере информационных технологий.

Ключевые слова: регрессионная модель, масштабирования данных, машинное обучение, автоматизация, оценка метрик модели машинного обучения, гибкая методология, управление ИТ-проектами.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире активно развивается информатизация, в связи с чем расширяется промышленный сектор по реализации информационно-технологических продуктов и решений. Этот процесс сопровождается увеличением объема и сложности

ИТ-проектов, требующих высокой точности в оценке ресурсных затрат и эффективности выполнения работ. Одним из ключевых аспектов успешного управления ИТ-проектами является точная оценка трудозатрат, позволяющая эффективно планировать ресурсы, соблюдать сроки и контролировать бюджет. Согласно исследованиям [2], более 80 % государственных ИТ-проектов превышают установленные сроки, по сравнению с примерно 50 % в частном секторе [1]. В среднем ИТ-проекты во всех секторах занимают на 46 % больше времени, чем планировалось, при этом вероятность превышения сроков на 20 % больше в государственном секторе. Примерно 18 % государственных ИТ-проектов сталкиваются со значительными отклонениями, при этом отставание от графиков достигает 41 %, а перерасход средств составляет в среднем 130 %. Каждый последующий год, запланированный на проект, увеличивает риск перерасхода бюджета на 15 %. Следует отметить, что упомянутое исследование проводилось на большой выборке, в которой участвовало 5 400 ИТ-проектов [2].

Часто при управлении проектами используется итеративно-инкрементальная модель, важным этапом которой является планировка и оценка задач и спринтов. Для уменьшения количества издержек при выполнении проектов предлагается использовать регрессионную модель, позволяющую оценивать трудозатраты с учетом накопленного в компании опыта. Модель встраивается в существующие системы в виде программного компонента, который будет реализовывать программный интерфейс для взаимодействия с другими подсистемами, что позволяет гибко интегрировать функционал в уже имеющиеся решения без кардинального изменения других подсистем. Данный подход обеспечит возможность частичной автоматизации процесса планирования на каждой итерации при исполнении проекта, что также снизит издержки при планировании работ.

Цель исследования состоит в анализе итеративно-инкрементальной модели ведения ИТ-проектов и частичной автоматизации процессов оценки трудозатрат за счет применения регрессионной модели, позволяющей учитывать предыдущий опыт работы и формировать предварительные оценки ресурсов и сложности задач.

АНАЛИЗ РАБОТЫ ИТЕРАТИВНО-ИНКРЕМЕНТАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Согласно исследованиям Д.Д. Лобасева [3] и А.А. Антонова [4], итеративно-инкрементальная модель (рис. 1) ведения ИТ-проектов получила широкое распространение и популярность благодаря таким ее достоинствам, как возможность адаптации к изменяющимся требованиям, работа в коротких циклах, фокусировка на коммуникации и сотрудничестве, регулярное получение обратной связи. Ключевым ее этапом является оценка результатов и планирование новой итерации, исходя из чего определяется успешность выполнения поставленных задач.



Рис. 1. Схематическое представление итеративно-инкрементальной модели

При использовании рассматриваемой модели процесс реализации проекта делится на отрезки (спринты), каждый из которых в свою очередь подразделяется на задачи. Эффективное выполнение задач влияет на эффективное выполнение спринта, а следовательно, и на выполнение ИТ-проекта. Тем не менее сектор сталкивается с проблемами недооценки или переоценки трудозатрат при планировании разработки.

Одним из путей решения данной проблемы является повышение точности оценки трудозатрат с учетом накопленного компанией опыта. Для этого предлагается осуществлять предварительную оценку трудозатрат, основанную на предыдущем опыте, с помощью методов искусственного интеллекта и машинного обучения. Основной для прогнозирования трудозатрат служит регрессионная модель. Для частичной автоматизации необходимо разработать программный компонент, который упростит разработку и внедрение регрессионной модели. Программный компонент на языке программирования Python разрабатывался с использованием библиотек NumPy, pandas, scikit-learn и Matplotlib.

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗРАБОТКИ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ

Ключевыми этапами разработки программной модели являются:
 постановка задачи и сбор данных,
 анализ данных,
 выбор признаков,
 построение и обучение модели,
 оценка модели и ее валидация.

Для сбора данных, необходимых для обучения и отладки модели, были использованы открытые источники, одним из которых послужил TAWOS. Данные сформированы на опыте работы 14 компаний с помощью программного обеспечения Jira. В банке данных находится 143 700 записей, которые были разделены на тестовую и обучающую выборку в процентном отношении 70 к 30. Целевым признаком для регрессионной модели будет фактическое время, затраченное на выполнение задачи.

Распределение является многомодальным и имеет несколько пиков, которые демонстрирует централизацию усилий в определенных временных диапазонах (рис. 2). При анализе распределения трудозатрат было выявлено, что примерно 47,6 % задач были выполнены менее чем за 500 минут каждая.

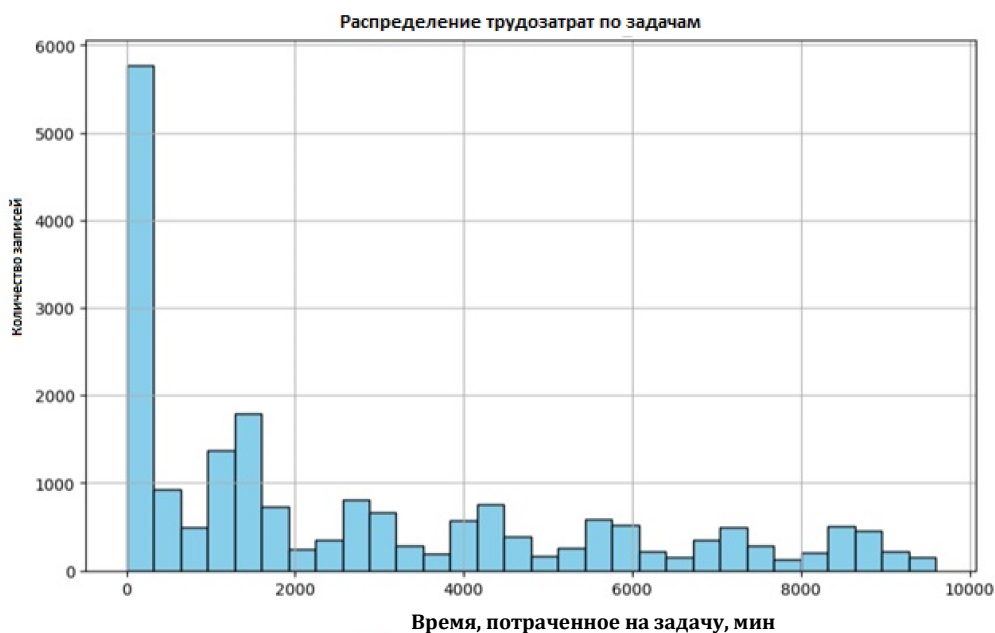


Рис. 2. Распределение целевого признака

Были построены распределения не только целевого признака, но и входных параметров, так как исследование входных данных может занимать много времени и выводы напрямую повлияют на качество работы регрессионной модели. В зависимости от природы данных они были разделены на числовые, бинарные, категориальные и текстовые. Каждая из этих категорий требует особого подхода при обработке и анализе.

Затем осуществлялась подготовка входных параметров для корректной обработки регрессионной модели. Этапы предобработки данных представлены на рис. 3.



Рис. 3. Ключевые этапы процесса предобработки данных

После удаления дубликатов данные были проанализированы на пропущенные значения. С помощью анализа распределений данных и зависимостей между ними произвели обработку выбросов и масштабирование данных. Категориальные данные были закодированы. После этого выполнялось масштабирование текстовых данных с помощью метода TDIF (Term Frequency-Inverse Document Frequency). Данный метод

представляет собой популярный способ векторизации текстовых данных, который позволяет оценить важность слова в документе относительно всего корпуса.

Написанный для успешного процесса обучения регрессионной модели алгоритм позволяет определять наиболее эффективную регрессионную модель при минимизации ошибки нахождения целевого признака.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для работы программного компонента на вход подается несколько моделей, которые предполагается использовать в дальнейшем, а также соответствующий набор гиперпараметров, требующих дальнейшей настройки. Алгоритм выбирает и возвращает наилучшую модель в зависимости от выбранной метрики оценки качества. В таблице представлены те регрессионные модели, которые оказались предпочтительными, а также передаваемые гиперпараметры для их оптимизации.

Результаты настройки гиперпараметров и оценка регрессионных моделей

Название модели	Гиперпараметры	Средняя абсолютная ошибка (минут)
Градиентный спуск	Темп обучения, количество деревьев, максимальная глубина, минимальное число для разбиения, минимальное число в листе, доля выборки, функция потерь	2 281,37
Линейная регрессия	Учитывать свободный член, копировать данные, количество потоков	2 821,37
Метод случайного дерева	Количество деревьев, максимальная глубина, минимальное число для разбиения, минимальное число в листе, максимальное число признаков, количество потоков	2 921,32

Основными показателями для оценки качества регрессионных моделей являются следующие метрики: средняя абсолютная ошибка, средняя квадратичная ошибка и коэффициент детерминации. Данные показатели позволяют оценить погрешность результатов в предсказании модели и выявить области для дальнейшего повышения точности прогноза. Средняя абсолютная ошибка показывает среднюю величину отклонений предсказанных значений от фактических, позволяет оценить степень ошибок, допущенных моделью, и сравнить точность предсказаний разных моделей. Средняя квадратичная ошибка помогает выявить систематические погрешности в работе модели. Коэффициент детерминации отражает долю вариации целевой переменной, описывает объяснительную способность модели.

Качество лучшей модели выбиралось по расчету средней квадратичной ошибки. Завершающим этапом разработки регрессионной модели является ее тестирование. В ходе тестирования были обработаны 43 000 записей о задачах и рассчитаны показатели качества модели.

На основе проведенного тестирования модели градиентного спуска были получены следующие показатели: средняя абсолютная ошибка составила 2 281,17, средняя квадратичная ошибка – 2 731,18, а коэффициент детерминации (R^2) 0,064. Полученное значение коэффициента детерминации ($R^2 = 0,064$) указывает на слабую совместимость

модели с исходными данными, т.е. модель объясняет всего около 6,4 % вариативности целевой переменной. Это свидетельствует о необходимости переобучения или использования дополнительных признаков для повышения ее объяснительной мощности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного нами исследования было подтверждено, что применение регрессионных моделей для оценки трудозатрат в рамках итеративно-инкрементальной методологии управления ИТ-проектами обладает значительным потенциалом для повышения эффективности планирования и автоматизации процессов оценки ресурсов. На основании анализа различных моделей можно сделать вывод о том, что регрессия градиентного спуска демонстрирует лучшие показатели по метрике средней абсолютной ошибки, несмотря на относительно низкий коэффициент детерминации (R^2). В связи с этим необходимо проводить доработку модели и расширять набор входных данных.

Результаты тестирования на большой выборке данных подтверждают применимость регрессионных подходов для предсказания трудозатрат, что позволяет снизить издержки, связанные с планированием, и повысить точность предварительных оценок. Внедрение таких моделей в существующие системы управления проектами в виде программных компонентов способствует автоматизации оценки ресурсов и более обоснованному распределению задач, а значит, повышению общей эффективности работы команд.

В будущем предполагается расширить модель, учитывая дополнительные факторы, улучшить качество данных и оптимизировать параметры алгоритмов. Это позволит увеличить точность прогнозов, что, в свою очередь, приведет к более точной и своевременной оценке трудозатрат и повышению управляемости ИТ-проектами в условиях высокой динамичности и сложности современных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tawosi V., Al-Subaihin A., Moussa R., Sarro F. A versatile dataset of agile open source software projects. *Proceedings of the 19th International Conference on Mining Software Repositories*. 2022. С. 707–711.
2. Крючкова Д.А. Проблемы оценки трудозатрат при реализации ИТ-проектов. взаимосвязь между оценкой трудоемкости работ в ИТ-проектах по методу story points и реальными трудозатратами // *Парадигма*. 2025. № 4-3. С. 143–151.
3. Лобасев Д.В. Agile-подход к разработке программных продуктов: истоки и перспективы // *Инновации и инвестиции*. 2022. № 11. С. 210–214.
4. Антонов А.А. Тенденции использования Agile-методологий в современной России // *Экономика и парадигма нового времени*. 2023. № 3 (20). С. 18–23.
5. Решетова Д.Г., Максимов Ю.В. Сложность многоклассового классификатора один-против-всех // *Труды Московского физико-технического института*. 2015. Т. 7. № 4 (28). С. 59–65.
6. Селиверстов Я.А., Комиссаров А.А., Лесоводская А.А., Бовыкин П.Г., Подтихов А.В., Торсионов С.С., Цирков Д.А., Орлов С.А. Разработка и исследование моделей многоклассовых классификаторов для рекомендательной системы подготовки заявок на портале единой информационной системы в сфере закупок // *Информатика, телекоммуникации и управление*. 2022. Т. 15. № 2. С. 43–62.
7. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных / пер. с англ. А.А. Слинкина. М.: ДМК Пресс, 2015. 400 с.

Для цитирования: Лукьянов Р.А., Карельская К.А. Применение регрессионных моделей для частичной автоматизации оценки трудозатрат в ИТ-проектах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 3 (31). С. 96–102.

APPLICATION OF REGRESSION MODELS FOR PARTIAL AUTOMATION OF WORKLOAD ESTIMATION IN IT PROJECTS

R.A. LUKYANOV, Postgraduate, K.A. KARELSKAYA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: rlukyanov12@yandex.ru

The article is devoted to the study of the potential of using regression models in the context of iterative-incremental methodology of IT project management. The first section of the paper reveals the theoretical foundations and methodological approaches underlying this area. The second part focuses on practical experience, as well as practical experience in setting up and developing regression models. as well as analyzing their effectiveness in assessing labor costs and resource planning, which contributes to improving the accuracy and effectiveness of management decisions in the field of information technology. Their effectiveness in assessing labor costs and resource planning in the field of information technology is considered.

Keywords: regression model, data scaling, machine learning, automation, evaluation of machine learning metrics, flexible methodology, AGILE, IT project management.

Поступила в редакцию/received: 15.04.2026; после рецензирования/revised: 22.04.2026;
принята/accepted: 24.04.2026

УДК 519.854.2

DOI: 10.46573/2658-5030-2026-3-102-110

ПЛАНИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИНЕЙНОГО РАСКРОЯ МЕТАЛЛОПРОКАТА МЕТОДАМИ ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

А.В. ИВАНОВ, асп., Ю.Н. МАТВЕЕВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: lexuzieel@gmail.com

© Иванов А.В., Матвеев Ю.Н., 2026

В статье рассмотрена задача оптимального линейного раскроя металлопроката при производстве железобетонных изделий. Обоснована актуальность снижения производственных отходов в строительной отрасли. Описана трехэтапная методика, объединяющая формирование планов раскроя, применение методов целочисленного линейного программирования и процедуру выбора оптимального решения на основе нескольких решений. Приведена математическая постановка задачи целочисленного

линейного программирования и приведен прикладной пример раскроя арматурных стержней.

Ключевые слова: линейный раскрой, металлопрокат, целочисленное линейное программирование, минимизация отходов, оптимизация.

ВВЕДЕНИЕ

Металлопрокат является одним из ключевых материалов современного промышленного строительства. В России по итогам 2025 года выпуск готового проката составил около 59 млн т [1], а строительная и машиностроительная отрасли остаются крупнейшими потребителями стальной продукции – совокупный внутренний спрос в указанном году составил порядка 38–39 млн т [2].

В производстве железобетонных изделий (ЖБИ) материальные затраты на металлопрокат часто составляют не менее 50 % от общей себестоимости продукции [3]. Производственные объемы строительных металлоконструкций в России достигают 8,5 млн т/год [4].

Особую роль в формировании указанных затрат играет этап раскроя арматурных стержней. Арматура поставляется стандартными длинами (6, 9 и 12 м), тогда как производственная программа требует стержней различных размеров в строго заданных количествах. Потери при раскрое металлопроката могут достигать 7 % согласно нормативу РДС 82-202-96 [5], но на практике они, как правило, выше. При текущих ценах на арматуру А500С [6] это приводит к значительным экономическим потерям. Сокращение отходов даже на 1 % дает существенную экономию по отрасли в целом.

Дискретная природа задачи заключается в невозможности использования «дробного» количества стержней. Это, в свою очередь, приводит к математической формулировке в виде задачи целочисленного линейного программирования (ЦЛП). Для решения задач данного класса часто применяются метод ветвей и границ [7] и метод отсечений Гомори [8]. Однако практическое использование этих методов в условиях производства ограничено их вычислительной сложностью [9], поэтому, как правило, применяются объединяющие их комбинированные подходы.

Настоящая статья посвящена описанию методики, объединяющей технологическое планирование раскроя с применением нескольких методов ЦЛП и процедурой выбора оптимального решения. Такой комплексный подход позволяет компенсировать недостатки отдельных алгоритмов и повысить достоверность получаемого решения.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ РАСКРОЯ МЕТАЛЛОПРОКАТА

1.1. Технологические ограничения

Процесс раскроя металлопроката в производстве ЖБИ характеризуется рядом жестких технологических ограничений, которые непосредственно определяют математическую природу задачи оптимизации [10]:

дискретность материалов: каждый прутوك либо используется целиком, либо разрезается на заранее заданные отрезки; частичное использование заготовки не допускается;

технологические припуски на рез: потери материала составляют 3...10 мм на рез в зависимости от применяемого оборудования;

ограничения производительности: план раскроя должен формироваться в рамках производственной смены с учетом длительности переналадки при смене типоразмеров;

изменчивость производственной программы: план может корректироваться в течение смены, что требует оперативного пересчета оптимального решения.

Анализ практики показывает, что при ручном планировании реальные потери материала достигают 5...8 % и выше [11], а эвристические подходы, несмотря на скорость выполнения, не гарантируют приемлемого качества решений при нестандартных соотношениях размеров деталей [12].

1.2. Математическая постановка задачи целочисленного линейного программирования

Дискретная природа переменных решений приводит к постановке задачи целочисленного линейного программирования [13]. Пусть имеется n вариантов раскроя стандартного прутка, тогда задача формулируется следующим образом:

$$\min f(x) = \sum w_j x_j, j = 1, \dots, n$$

при ограничениях:

$$\begin{aligned} \sum a_{ij} x_j &\geq b_i, i = 1, \dots, m; \\ x_j &\in \mathbb{Z} \geq 0, j = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Здесь x_j – количество применений j -го варианта раскроя (целочисленная неотрицательная переменная); w_j – величина отходов при j -м варианте раскроя; a_{ij} – количество фрагментов i -го типоразмера, получаемых при j -м варианте раскроя; b_i – требуемое количество фрагментов i -го типоразмера согласно производственной спецификации.

Таким образом, целевая функция минимизирует суммарные отходы металлопроката, ограничения обеспечивают выполнение производственной программы по каждому типоразмеру, а условие целочисленности отражает физическую невозможность применения «дробного» числа вариантов раскроя.

2. МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ РАСКРОЯ

Представляемая в данной статье методика является трехэтапным процессом, непосредственно вытекающим из структуры технологического процесса подготовки арматуры: на вход приходит спецификация арматуры, информация о наличии и стандартных длинах фрагментов. После этого составляется план линейного раскроя, решается задача оптимизации несколькими методами и производится выбор оптимального решения. Подробная схема методики дана на рис. 1.

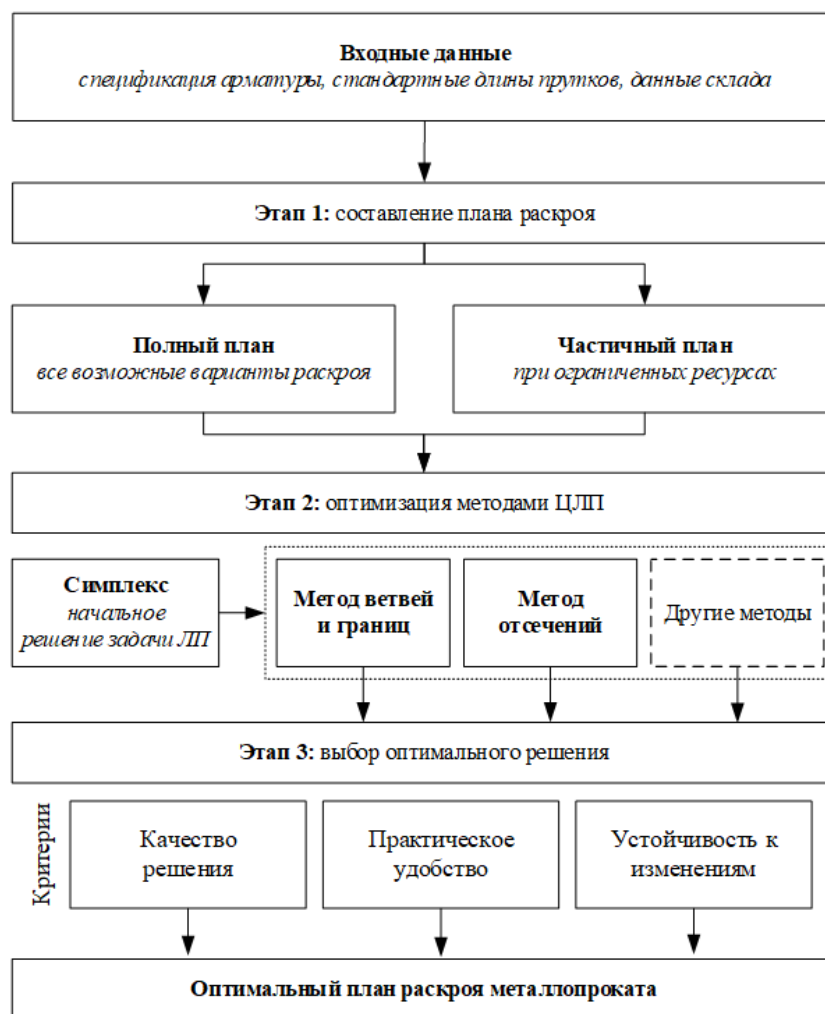


Рис. 1. Схема методики планирования и оптимизации раскроя металлопроката (ЛПП – линейное программирование)

2.1. Составление плана раскроя

На первом этапе генерируется множество всех допустимых вариантов раскроя стандартного прутка на требуемые типоразмеры. Каждый вариант раскроя j задается вектором $(a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj})$, где a_{ij} – количество фрагментов i -го типоразмера, и величиной отходов w_j . В зависимости от вычислительных ресурсов и требований к точности применяются два подхода:

полный план раскроя: генерируются все математически возможные варианты с учетом технологических ограничений. В этом случае обеспечивается наилучшее качество решения, однако при большом числе типоразмеров размерность задачи существенно возрастает;

частичный план раскроя: отбирается подмножество наиболее перспективных вариантов по эвристическим правилам (приоритет отдается вариантам с минимальными отходами и максимальным числом получаемых фрагментов). Применяется при ограниченных временных и вычислительных ресурсах.

2.2. Оптимизация методами целочисленного линейного программирования

На втором этапе на основе сформированного плана раскроя строится математическая модель задачи ЦЛП, которая решается несколькими методами. Одновременное использование нескольких алгоритмов является ключевой особенностью методики: это позволяет компенсировать недостатки отдельных методов и повысить надежность итогового решения.

В рамках методики применяются следующие методы:

симплекс-метод для получения нецелочисленного оптимального решения задачи ЛП, которое служит начальной точкой для методов ЦЛП. По этой причине данный метод используется всегда;

метод ветвей и границ – классический точный метод, гарантирующий нахождение оптимального целочисленного решения при достаточном вычислительном времени;

метод отсечений (метод Гомори) – поэтапно сужает область допустимых решений, добавляя дополнительные ограничения-отсечения;

итерационный алгоритм на основе минимизации Евклидова расстояния. Поиск ведется от точки нецелочисленного оптимума в глубь области допустимых решений, направление движения на каждом шаге определяется минимизацией евклидовой метрики между текущей точкой и точкой нецелочисленного решения [14]. Более подробно данный алгоритм описан в источниках [15–17].

2.3. Выбор оптимального решения

На третьем этапе выбирается решение из набора, полученного с помощью разных методов. В результате определяется наилучшее по совокупности следующих критериев:

качество решения: величина суммарных отходов металлопроката;

практическое удобство реализации: сложность плана раскроя с точки зрения производственного персонала. Например, решение с большим числом различных шаблонов требует частой переналадки оборудования и усложняет организацию рабочих мест;

устойчивость к изменениям: чувствительность решения к незначительным корректировкам производственной программы.

Если несколько методов дают одинаковое значение целевой функции, предпочтение отдается решению с наименьшим числом различных вариантов раскроя, что упрощает его практическую реализацию.

3. ДЕМОНСТРАЦИЯ НА ПРИКЛАДНОМ ПРИМЕРЕ

3.1. Постановка задачи

Рассмотрим задачу оптимизации раскроя арматурных стержней, типичную для строительных компаний, самостоятельно производящих ЖБИ [18]. Требуется минимизировать отходы при раскрое стержней стандартной длины 750 см для получения стержней трех типоразмеров: 250, 200 и 150 см. Производственная программа предусматривает изготовление 200 стержней длиной 250 см, 250 стержней длиной 200 см и 50 стержней длиной 150 см.

3.2. Формирование плана раскроя

На первом этапе генерируются все допустимые варианты раскроя арматурных стержней длиной 750 см:

Вариант раскроя	250 см	200 см	150 см	Отходы, см	Количество разрезов
1	3	0	0	0	3
2	2	1	0	50	3
3	2	0	1	100	3
4	1	2	0	100	3
5	1	1	2	0	4
6	1	0	3	50	4
7	0	3	1	0	4
8	0	2	2	50	4
9	0	1	3	100	4
10	0	0	5	0	5
Требуемое количество	200	250	50	—	—

Таким образом, для данной задачи сформировано 10 допустимых **вариантов** раскроя. Вариант 1 (три стержня по 250 см, без отходов) и вариант 7 (три стержня по 200 см, без отходов) являются наиболее эффективными с точки зрения минимизации потерь. Выше варианты с отходами, равными 0, выделены жирным шрифтом. Очевидно, что для выбора наиболее подходящего плана требуется больше информации. На этот вопрос отвечают критерии, определяемые на третьем этапе методики. Визуализация планов раскроя, наглядно демонстрирующая различные комбинации, приведена на рис. 2.



Рис. 2. Визуализация плана раскроя арматурных стержней длиной 750 см

3.3. Постановка задачи целочисленного линейного программирования

На основе приведенных в п. 3.2 вариантов раскроя арматурных стержней длиной 750 см формируется задача ЦЛП. Обозначим через x_j количество применений j -го варианта раскроя. Целевая функция – минимизация суммарных отходов:

$$\min f(x) = 0x_1 + 50x_2 + 100x_3 + 100x_4 + 0x_5 + 50x_6 + 0x_7 + 50x_8 + 100x_9 + 0x_{10}$$

при следующих ограничениях на обеспечение требуемого количества стержней каждого типоразмера:

$$\begin{aligned} 3x_1 + 2x_2 + 2x_3 + x_4 + x_5 + x_6 &\geq 200 && (\text{стержни 250 см}); \\ 2x_2 + 2x_4 + x_5 + 3x_7 + 2x_8 + x_9 &\geq 250 && (\text{стержни 200 см}); \\ x_3 + 2x_5 + 3x_6 + x_7 + 2x_8 + 3x_9 + 5x_{10} &\geq 50 && (\text{стержни 150 см}); \\ x_j \in \mathbb{Z} \geq 0, j &= 1, \dots, 10. \end{aligned}$$

Требование целочисленности переменных x_j обусловлено невозможностью применения «дробного» числа раскроев, поскольку каждый стержень разрезается по определенной схеме целое число раз.

3.4. Решение задачи целочисленного линейного программирования несколькими способами и выбор оптимального плана

В соответствии с разработанной методикой задача решается несколькими способами. На первом шаге симплекс-метод находит нецелочисленное оптимальное решение задачи ЛП (без ограничения целочисленности), которое служит начальной точкой для алгоритмов ЦЛП.

На втором этапе решение методом ветвей и границ, методом Гомори и другими методами дает набор допустимых целочисленных решений. Необходимость решения несколькими способами обусловлена тем, что не все методы дают оптимальное решение для каждой задачи.

Процедура выбора оптимального плана на третьем этапе основана на сравнении полученных решений по критериям минимальности отходов и практического удобства реализации, которые зависят от организации работы на конкретном предприятии.

В данном примере оптимальное решение достигается при использовании вариантов с нулевыми отходами (варианты 1, 5, 7, 10, см. п. 3.2), что обеспечивает практически безотходный раскрой, однако с практической точки зрения не все из них являются равноценными. В частности, если принять, что необходимо произвести несколько видов ЖБИ и большинство изделий требуют отрезков по 200 см, то в таком случае именно вариант 7 раскроя будет оптимальным.

Подобные критерии дают наибольший эффект для крупных промышленных объектов. Например, при полной генерации для задачи изготовления стержней длиной 2 400, 1 800, 1 200, 800, 600 мм из заготовки 6 000 мм получается 384 варианта раскроя. Однако только 45–60 из них имеют коэффициент использования материала выше 85 % и включают не более трех типоразмеров. Для проекта многоэтажного здания, где требуются тысячи стержней различных размеров, сокращение отходов даже на 2–3 % обеспечивает существенную экономию и повышает конкурентоспособность предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика планирования и оптимизации линейного раскроя металлопроката ориентирована на практические условия производства ЖБИ. Методика объединяет три этапа: формирование плана раскроя, оптимизацию несколькими методами ЦЛП и процедуру выбора оптимального решения на основе критериев.

Ключевым отличием предложенного подхода от существующих способов, улучшающих отдельные алгоритмы, является комплексность: охватывается весь цикл, от составления вариантов раскроя до выбора итогового плана, с учетом технологических ограничений реального производства. Это позволяет компенсировать недостатки отдельных методов ЦЛП и повысить надежность решений.

Практическая значимость методики подтверждена на примере задачи раскроя арматуры: при годовом потреблении металлопроката свыше 10 млн т по отрасли снижение отходов даже на 1 % обеспечивает значительную экономию.

Дальнейшие исследования планируется посвятить более детальному изучению и формализации критериев и анализу сценариев их применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Операционные и финансовые результаты Северстали за 4 кв. и 12 мес. 2024 года. URL: <https://severstal.com/rus/media/archive> (дата обращения: 05.09.2025).
2. Металлопотребление в РФ выросло на 7 % за счет строительства инфраструктуры и машиностроения. URL: <https://vmeste.severstal.com/expert/metallopotreblenie-v-rf-vyroslo-na-7-za-schet-stroitelstva-infrastruktury-i-mashinostroeniya/> (дата обращения: 05.09.2025).
3. Rady M., Mahfouz S.Y., Taher S. Optimal Design of Reinforced Concrete Materials in Construction // *Materials*. 2022. V. 15. № 7. С. 2625.
4. За 2018–2022 гг. производство строительных металлоконструкций в России увеличилось почти на 70 %: с 5,1 до 8,5 млн т. URL: <https://marketing.rbc.ru/articles/14547/> (дата обращения: 05.09.2025).
5. РДС 82-202-96. Правила разработки и применения нормативов трудноустраняемых потерь и отходов материалов в строительстве. 1997. URL: <https://obratkatrub.ru/assets/img/stati/rds82.pdf> (дата обращения: 05.09.2025).
6. Динамика цен на арматуру А500С за последние полгода. URL: https://www.mcena.ru/metalloprokat/armatura/a500s-gost-r-52544_dinamica (дата обращения: 05.09.2025).
7. Land A.H., Doig A.G. An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems // *Econometrica*. 1960. V. 28. № 3. Р. 497.
8. Трушков А.С. Метод отсекающих плоскостей Гомори. *Актуальные вопросы современной информатики: Материалы VII Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции*. Коломна: Государственный социально-гуманитарный университет, 2017. С. 101–107.
9. Afraimovich L.G. A heuristic method for solving integer-valued decompositional multiindex problems // *Automation and Remote Control*. 2014. V. 75. № 8. Р. 1357–1368.
10. Белецкий Б.Ф. Технология и механизация строительного производства: учебник. 4-е изд., стереотип. СПб.: Лань, 2021. 752 с.
11. Kwon K., Kim D., Kim S. Cutting waste minimization of rebar for sustainable structural work: A systematic literature review // *Sustainability*. 2021. V. 13. № 11. С. 5929.
12. Золотарев А.А., Венцов Н.Н., Агибалов О.И., Деева А.С. Оптимизация распределительных процессов на основе аналитических методов и эвристических

алгоритмов // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2016. Т. 2. № 1. С. 74–82.

13. Фурина К.О. Методы целочисленного программирования на примере задачи об оптимальном раскрое материала // *Журнал научных и прикладных исследований*. 2015. № 8. С. 97–101.

14. Амелькин С.А., Захаров А.В., Хачумов В.М. Обобщенное расстояние Евклида Махаланобиса и его свойства // *Информационные технологии и вычислительные системы*. 2006. № 4. С. 40–44.

15. Иванов А.В., Матвеев Ю.Н. Поиск решения задачи целочисленного программирования с помощью итеративного округления координат // *Программные продукты и системы*. 2023. Т. 36. № 4. С. 539–550.

16. Иванов А.В., Матвеев Ю.Н. Алгоритм решения задач целочисленного программирования с применением итеративного округления координат // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2023. № 7. С. 149–152.

17. Матвеев Ю.Н., Иванов А.В. Использование метода покоординатного спуска для поиска решения задачи целочисленного программирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 53–62.

18. Brezina I., Kultan J., Pekár J. Optimization of Cutting Large Amounts of Dense Material // *TEM Journal*. 2024. V. 13. № 1. P. 26–35.

Для цитирования: Иванов А.В., Матвеев Ю.Н. Планирование и оптимизация линейного раскроя металлопроката методами целочисленного программирования // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 3 (31). С. 102–110.

PLANNING AND OPTIMIZATION OF LINEAR CUTTING OF METAL PRODUCTS USING INTEGER PROGRAMMING METHODS

A.V. IVANOV, Postgraduate, Yu.N. MATVEEV, Dr. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: lexuzieel@gmail.com

The article considers the problem of optimal linear cutting of metal products in the production of reinforced concrete structures. The relevance of reducing production waste in the construction industry is substantiated. A three-stage methodology is described that combines the formation of cutting plans, the application of integer linear programming methods, and a procedure for selecting the optimal solution. The mathematical formulation of the integer linear problem is given and an applied example of cutting reinforcing bars is considered. The practical significance of the developed approach for minimizing metal waste at industrial construction enterprises is shown.

Keywords: linear cutting, metal products, integer linear programming, waste minimization, optimization.

Поступила в редакцию/received: 22.04.2026; после рецензирования/revised: 24.04.2026;
принята/accepted: 29.04.2026

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ ПО ВИЗУАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Е.Е. ФОМИНА, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: f-elena2008@yandex.ru

© Фомина Е.Е., 2026

В статье описана автоматизированная система для поддержки принятия решений при судебно-медицинской идентификации личности по фото- и видеоматериалам. Система построена по модульному принципу, что обеспечивает ее гибкость и возможность интеграции новых аналитических алгоритмов. Особое внимание уделено комплексному извлечению как количественных, так и качественных биометрических признаков головы, включая анализ красной каймы губ, ушной раковины, прогнозирование пола и расовой принадлежности, а также анализ походки. Каждый модуль ориентирован на извлечение специфических признаков для формирования индивидуального профиля. Модуль поддержки принятия решений агрегирует данные, выполняет взвешенное сопоставление с базой данных известных лиц и формирует итоговое заключение. Разработанная система повышает объективность, точность и скорость идентификации, автоматизируя трудоемкие процессы.

Ключевые слова: автоматизированная система, поддержка принятия решений, идентификация личности, биометрическая идентификация, фотоматериалы, видеоматериалы.

ВВЕДЕНИЕ

Идентификация личности представляет собой важную задачу, которая находит широкое применение в различных сферах деятельности, однако особую значимость она приобретает в контексте судебно-медицинской экспертизы. Именно здесь, столкнувшись с необходимостью установления личности погибших, пропавших без вести или неопознанных лиц, эксперты сталкиваются с наиболее сложными вызовами. В условиях комплексного сочетания возрастающих угроз, связанных с терроризмом, военными конфликтами, миграционными процессами, проблема идентификации личности становится все более острой [1–3].

Традиционные методы идентификации, основанные на антропометрических измерениях, дактилоскопии, стоматологических и медицинских записях, зачастую оказываются недостаточными или неприменимыми ввиду отсутствия необходимых данных. Вместе с тем стремительное развитие цифровых технологий открывает новые горизонты для решения этой задачи. Фото- и видеоматериалы, становясь все более распространенными источниками информации, предоставляют богатые возможности для извлечения и анализа визуальных признаков, характеризующих индивидуальность человека. Эффективное использование этих материалов при проведении судебно-медицинской экспертизы требует разработки новых методов и инструментов [4–6].

Актуальна задача создания комплекса программно-алгоритмических решений, предназначенных для обработки информации такого формата, выделения релевантных признаков и формирования рекомендаций для последующего принятия решения экспертом, проводящим исследование.

Представленная работа посвящена разработке автоматизированной системы для поддержки принятия решений в процессе идентификации личности неопознанных и без вести пропавших лиц по фото- и видеоматериалам.

АРХИТЕКТУРА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Архитектура разработанной автоматизированной системы построена по модульному принципу, что обеспечивает гибкость, масштабируемость и возможность поэтапного дополнения и развития (рис. 1).

Система включает в себя следующие модули:

1. Модуль ввода исходных данных, отвечающий за прием и предварительную обработку различных типов входных материалов. Он позволяет работать с графическими файлами (JPEG, PNG, TIFF) и видеофайлами (AVI, MP4). Включает функции нормализации и масштабирования изображений.

2. Группа специализированных аналитических модулей, предназначенных для обработки разнородной информации, специфичной для различных типов идентификационных данных. Модули активируются исходя из типа и характеристик поданного на вход материала. Сюда входят модуль анализа фотоматериала (содержит блоки лицевой биометрии, биометрии красной каймы губ и ушной раковины, расовой диагностики) и модуль анализа видеоматериала.

3. Модуль поддержки принятия решений, который объединяет результаты работы аналитических модулей, ранжирует потенциальные совпадения по степени вероятности и предоставляет эксперту структурированный отчет с рекомендациями. Применяет методы машинного обучения для повышения точности и самообучения на основе обратной связи от эксперта.

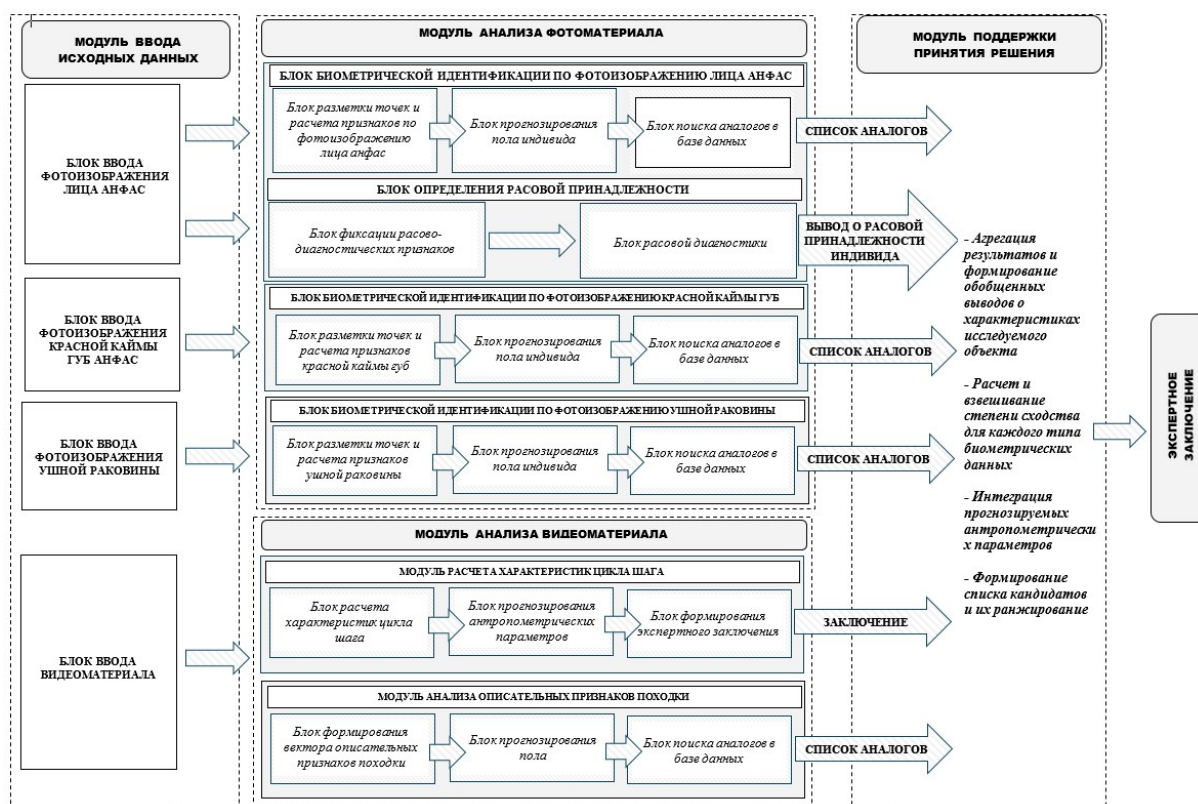


Рис. 1. Схема автоматизированной системы поддержки принятия решений в задачах идентификации личности по визуальным данным

ОПИСАНИЕ МОДУЛЕЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Модуль ввода исходных данных отвечает за прием поступающих визуальных данных. На вход системы может поступать следующая информация:

фотоизображение лица индивида анфас (используется для биометрической идентификации);

фотоизображение губ анфас (для идентификации по биометрическим признакам красной каймы губ);

фотоизображение ушной раковины (для идентификации по биометрическим признакам ушной раковины);

фрагмент видеозаписи (для анализа описательных и динамических признаков походки человека).

В зависимости от типа и состава анализируемого материала эксперт активизирует работу соответствующего аналитического модуля. Если входной материал содержит изображения лица, красной каймы губ или ушной раковины, то информация направляется в модуль анализа фотоматериала, если же он содержит видеоданные – в модуль анализа видеоматериала.

Модуль анализа видеоматериала предназначен для извлечения и оценки характеристик, связанных с двигательными стереотипами индивида. Функционал данного модуля включает анализ характеристик цикла шага и анализ описательных признаков походки.

В случае анализа характеристик цикла шага информация проходит обработку в несколько этапов. На вход модуля поступает видеоряд, содержащий кадры, соответствующие нескольким последовательным шагам. В блоке выделения признаков эксперт производит фиксацию начального и конечного кадра для выделения полного цикла шага. Фиксация кадров выполняется вручную на основе визуально определяемого момента контакта опорной ноги с поверхностью. Воспроизводимость фиксации подтверждена результатами исследования. При независимой обработке одних и тех же видеоматериалов (50 шагов) двумя экспертами вариативность полученных данных составила менее 1 % (коэффициент ICC составил 0,99), что свидетельствует о высокой согласованности оценок.

Затем на основе данных о положении стопы рассчитываются характеристики:

длина первого и второго периодов двойной опоры в секундах и процентах от цикла шага;

длина первого и второго периодов одиночной опоры в секундах и процентах от цикла шага;

длина цикла шага в секундах;

частота ходьбы, т.е. количество шагов в минуту;

темп ходьбы.

Для корректного исследования характеристик цикла шага происходит обработка нескольких последовательных шагов, расчет основных показателей и усреднение полученных значений по всем обработанным шагам. В результате формируется вектор признаков, содержащий одиннадцать координат. Данный вектор представляет собой выходную информацию блока выделения признаков, которая затем передается в блок прогнозирования антропометрических параметров, основанный на прогностических моделях машинного обучения. При помощи разработанных модели Random Forest, нейронной сети прямого распространения и уравнения логистической регрессии прогнозируются такие параметры, как рост, индекс массы тела и пол индивида.

Спрогнозированные антропометрические параметры и вектор значений характеристик цикла шага интегрируются в общий профиль индивида и могут использоваться для уточнения идентификации в модуле поддержки принятия решений или для создания более полного портрета личности.

В случае анализа походки эксперт анализирует видеозапись с целью формирования вектора описательных признаков походки. Используя электронный классификатор, содержащийся в программном комплексе, фиксируются варианты развития того или иного признака согласно заданному атласу. Атлас признаков включает 21 фактор, учитывающий положение головы, динамику рук, постановку стоп, динамику и форму ног, положение корпуса, телосложение и общее положение фигуры при ходьбе.

Данный блок делает систему более комплексной с учетом того, что не все идентификационные признаки можно охарактеризовать количественными значениями, а описательные характеристики часто играют важную роль в экспертной оценке.

Сформированный вектор описательных признаков передается в блок поиска аналогов в базе данных, предназначенный для сопоставления и формирования группы индивидов из списка известных лиц, особенности ходьбы которых схожи с особенностями ходьбы анализируемого индивида. Вектор описательных признаков, характеризующих индивида, и построенный список аналогов передаются в модуль поддержки принятия решений.

Модуль анализа фотоматериала предназначен для извлечения и количественной оценки статических идентификационных признаков из поданных изображений лица, красной каймы губ или ушной раковины [8, 9].

В зависимости от типа материала изображение поступает в один из следующих блоков.

1. Блок биометрической идентификации по фотоизображению лица анфас. На вход поступает фотография лица индивида анфас, эксперт делает разметку реперных точек. Затем в автоматическом режиме происходит расчет расстояний согласно «радиальной системе разметки» [9] и формирование вектора уникальных признаков лица. При необходимости вектор признаков поступает на вход блока прогнозирования пола индивида, который основан на использовании таких методов машинного обучения, как Random Forest и дискриминантный анализ. Далее вектор признаков преобразуется в вектор категорий (перевод в категории происходит с учетом пола индивида). Сформированный вектор поступает на вход блока поиска аналогов в базе данных известных лиц, содержащей категории биометрических признаков лиц индивидов, личность которых установлена.

В результате работы данного блока в модуль поддержки принятия решений передается следующая информация: извлеченные значения биометрических признаков лица, вектор с категориями признаков, половая принадлежность идентифицируемого индивида, а также список кандидатов для проведения дальнейшей более детальной идентификации.

2. Блок биометрической идентификации по фотоизображению красной каймы губ. На вход поступает фотография красной каймы губ анфас, эксперт делает разметку опорных точек. Затем в автоматическом режиме происходит расчет признаков, описывающих красную кайму губ. При необходимости вектор признаков поступает на вход блока прогнозирования пола индивида, который основан на использовании таких методов машинного обучения, как Random Forest и логистическая регрессия. Далее вектор признаков преобразуется в вектор категорий (перевод в категории происходит с учетом пола индивида). Сформированный набор категорий поступает на вход блока поиска аналогов в базе данных известных лиц, содержащей категории признаков красной каймы губ индивидов, личность которых установлена.

В результате работы данного блока в модуль поддержки принятия решений передается следующая информация: извлеченные значения биометрических признаков красной каймы губ, вектор с категориями признаков, половая принадлежность

идентифицируемого индивида, а также список кандидатов для проведения дальнейшего более детального исследования.

3. Блок биометрической идентификации по фотоизображению ушной раковины. На вход поступает фотография ушной раковины анфас, эксперт делает разметку опорных точек. Затем в автоматическом режиме происходит построение базиса и расчет размерных характеристик, описывающих ушную раковину. При необходимости вектор признаков поступает на вход блока прогнозирования пола индивида, который основан на использовании таких методов машинного обучения, как Random Forest и логистическая регрессия. Далее вектор признаков преобразуется в вектор категорий (перевод в категории происходит с учетом пола индивида). Сформированный набор категорий поступает на вход блока поиска аналогов в базе данных известных лиц, содержащей категории признаков ушной раковины индивидов, личность которых установлена.

В результате работы данного блока в модуль поддержки принятия решений передается следующая информация: извлеченные значения биометрических признаков ушной раковины, вектор с категориями признаков, половая принадлежность идентифицируемого индивида, а также список кандидатов для проведения дальнейшего более детального исследования.

Воспроизводимость разметок, используемых в модуле анализа фотоматериала, оценивалась путем расчета статистики Каппа Коэна для межэкспертной согласованности (в разметке принимали участие три эксперта, количество размечаемых фотоизображений – 60) (табл. 1).

Таблица 1. Значение статистики Каппа Коэна

Блок	Значение
Фотоизображение лица анфас	0,86
Красная кайма губ	0,72
Ушная раковина	0,77

Полученные показатели согласованности подтверждают надежность предложенных методик разметки.

4. Блок диагностики европеоидно-монголоидной принадлежности. На вход поступает фотография индивида. Затем эксперт фиксирует категории развития того или иного расово-диагностического признака согласно классификатору признаков. Полученные данные направляются в блок расовой диагностики, где с помощью итерационных формул поэтапно уточняется вероятность принадлежности индивида к той или иной расе на основе совокупности зафиксированных признаков. По результатам расчета формируется итоговый вывод о достоверной или вероятной принадлежности индивида к европеоидной или монголоидной расе либо заключение о невозможности установления расовой принадлежности.

Индивид достоверно принадлежит к определенной расе (европеоидной или монголоидной), если на каком-либо шаге расчета получена вероятность принадлежности к этой расе, равная 1,0, или вероятность, полученная на последнем шаге расчета, превышает 0,95. Индивид вероятно принадлежит к определенной расе (европеоидной или монголоидной), если вероятность, полученная на последнем шаге расчета, находится в диапазоне [0,75; 0,95]).

В результате работы данного блока в модуль поддержки принятия решений передается следующая информация: варианты развития каждого зафиксированного признака, вероятности встречаемости данного варианта у европеоидов и монголоидов,

рассчитанные вероятности принадлежности исследуемого индивида к той или иной расе на каждом шаге итерационного процесса, вывод о расовой принадлежности. В том случае, если расовая принадлежность индивида не была установлена, эксперт, анализируя представленные данные, может определить преобладание в облике монголоидных или европеоидных черт, опираясь на рассчитанные вероятности.

Несмотря на то, что европеоидно-монголоидная модель расовых различий является упрощенной и не учитывает смешанные типы, в контексте судебно-медицинской идентификации она сохраняет прикладную ценность благодаря своей относительной простоте, понятности и возможности проведения первичной дифференциации на основе статистически значимых морфологических признаков. Диагностика такого рода позволяет сузить круг поиска при проведении экспертизы неопознанных лиц.

Модуль поддержки принятия решений является интегрирующим компонентом автоматизированной системы. Его задача заключается в агрегации результатов, полученных от аналитических модулей, и формировании отчета, на основе которого эксперт будет принимать окончательное решение касательно идентификации личности индивида, изображенного на фото или видео. Модуль обеспечивает переход от частных заключений к комплексному выводу с учетом специфики каждого типа входных данных.

Функционал модуля поддержки принятия решений включает следующие задачи:

1. Агрегацию результатов из различных аналитических модулей. На вход модуля поступают выходные данные от модуля анализа фотоматериала (список лиц из базы данных известных лиц, имеющих сходные признаки ушной раковины, красной каймы губ, биометрические признаки лица, а также результат расовой диагностики) и модуля анализа видеоматериала (вектор характеристик цикла шага, список лиц из базы данных известных лиц, имеющих описательные признаки походки, сходные с признаками исследуемого индивида).

2. Расчет и взвешивание степени сходства. В случае если для идентификации используется несколько признаков (например, фотоизображение лица, уха и красной каймы губ), для каждого типа биометрических данных вычисляются соответствующие метрики сходства (евклидово и манхэттенское расстояние).

Для определения финального результата используется один из следующих критериев:

надежность (если результат, полученный одним из модулей, демонстрирует высокий уровень достоверности, то этот результат принимается как окончательный);

согласие (если несколько модулей сходятся в идентификации одного и того же эталонного образца, то этот результат считается верным);

голосование (учитывается количество модулей, идентифицировавших конкретный эталон, и выбирается наиболее часто встречающийся вариант).

Такой подход позволяет избежать субъективного выбора весов и опирается на внутреннюю надежность каждого модуля, оцененную на этапе валидации.

3. Интеграция прогнозируемых антропометрических параметров. Прогнозируемые рост, индекс массы тела и пол индивида, полученные из модулей анализа фото- и видеоматериала, используются для дополнительной верификации. Например, если для кандидата из базы данных известны точные антропометрические данные, модуль позволяет использовать их для фильтрации или повышения/понижения его позиции в списке совпадений.

4. Формирование списка кандидатов и их ранжирование. На основе агрегированных и взвешенных результатов в модуле формируется окончательный ранжированный список потенциальных кандидатов на идентификацию.

5. Формирование выходного заключения. Результат работы модуля представляется в виде отчета, содержащего:

исходные данные, поступившие на вход (например, ссылки на фото/видео);
полученные векторы признаков и антропометрические прогнозы;
список кандидатов с их оценками сходства.

Представленный отчет является базой для принятия решения судебно-медицинским экспертом.

Разработанная автоматизированная система может быть использована при проведении судебно-медицинской экспертизы и криминалистической идентификации неопознанных лиц и без вести пропавших, при установлении личности по архивным фото- и видеоматериалам, а также при розыске лиц.

ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

Для оценки эффективности отдельных модулей системы биометрической идентификации были рассчитаны показатели процента верно идентифицируемых объектов, а также метрики диагностики пола на тестовой выборке. Эксперименты проводились с использованием кросс-валидации, а финальные результаты для каждого модуля представлены в виде доверительных интервалов (95%-й доверительный интервал) для оценки их надежности (табл. 2).

Таблица 2. Показатели эффективности отдельных модулей системы биометрической идентификации

Блок биометрической идентификации	Доверительный интервал для процента верно идентифицируемых объектов	Объем обучающей /тестовой выборки	Диагностика пола		
			Общая точность	Recall (мужской пол)	Recall (женский пол)
Качественные признаки походки	(61,9–77,0 %)	364/156	0,82	0,93	0,78
Фотоизображение лица анфас	(82,8–90,1 %)	245/105	0,99	0,99	0,98
Фотоизображение красной каймы губ	(74,3–84,7 %)	245/105	0,79	0,77	0,80
Фотоизображение ушной раковины	(76,8–82,9 %)	457/196	0,81	0,79	0,82

Высокую точность продемонстрировал модуль идентификации по фотоизображению лица анфас (82,8–90,1 %). Он также показал высокую точность диагностики пола (0,98–0,99 для обоих полов), что делает его наиболее надежным решением в рамках исследуемой системы.

Промежуточные результаты показал модуль идентификации по признакам ушной раковины (76,8–82,9 %). Его преимущество – стабильно высокая точность диагностики пола для обеих групп (0,79–0,82).

Более низкие результаты показал модуль идентификации по признакам красной каймы губ (74,3 %–84,7 %). Точность диагностики пола оказалась выше для женщин (0,80 против 0,77 у мужчин), хотя общая точность осталась умеренной.

Наименее точным оказался модуль идентификации по качественным признакам походки (61,9 %–77,0 %). Несмотря на высокую точность диагностики мужского пола (0,93), для женщин этот показатель резко снизился до 0,78. Таким образом,

фотографические биометрические признаки превосходят признаки походки по точности идентификации. представлены

Метрики качества при прогнозировании индекса массы тела (ИМТ) и роста по характеристикам цикла шага в табл. 3. Точность диагностики пола составила 79 %.

Таблица 3. Метрики качества при прогнозировании ИМТ и роста

Метрика	ИМТ	Рост
MSE	26,03	52,66
RMSE	5,10	7,25 см
MAPE	16 %	3,4 %

Прогнозирование роста осуществляется наиболее точно: MAPE всего 3,4 % при RMSE 7,25 см. Такая точность может быть достаточной для решения прикладных задач. Прогнозирование ИМТ характеризуется более высокой ошибкой (MAPE 16 %, RMSE 5,10). Эта ошибка может быть связана с влиянием внешних факторов, таких как одежда и осанка, которые искажают визуальные пропорции тела и затрудняют точную оценку ИМТ на основе морфологических признаков. Диагностика пола с точностью 79 % подтверждает, что гендерные различия частично закодированы в анализируемых антропометрических и морфологических признаках. Однако 20 % ошибок указывают на перекрытие распределений признаков между полами, что типично для биологических данных.

Для демонстрации вклада каждого биометрического признака в общую систему идентификации было проведено комплексное тестирование. Метрики качества представлены в табл. 4.

Таблица 4. Показатели точности при использовании нескольких блоков

Блоки биометрической идентификации	Доверительный интервал для процента верно идентифицируемых объектов
Фотоизображение лица анфас	(82,8–90,1 %)
Фотоизображение лица анфас + + фотоизображение красной каймы губ	(86,2–92,3 %)
Фотоизображение лица анфас + + фотоизображение ушной раковины	(87,1–93,2 %)
Фотоизображение лица анфас + фотоизображение ушной раковины + + фотоизображение красной каймы губ	(89,2–94,3 %)

Добавление биометрических признаков к фотоизображению лица анфас приводит к последовательному увеличению доверительного интервала для процента верно идентифицируемых объектов. Комбинация всех трех признаков позволила достичь максимальной эффективности, с верхним пределом доверительного интервала в 94,3 %. Это демонстрирует значительное улучшение надежности идентификации за счет комплексного подхода и подчеркивает важность каждого из исследованных признаков в контексте построения комплексной системы.

Время обработки запроса зависит от типа анализируемого биометрического материала, его качества и этапа идентификации:

фотоизображение лица: 1–3 мин (выделение ключевых точек);

фотоизображения красной каймы губ/ушной раковины: 1–2 мин (разметка опорных точек);

видеозапись походки: 1–4 мин (время значительно зависит от качества исходного материала, удаленности съемки и контраста между опорой и обувью).

Поиск аналогов в базе данных составляет около 0,3 с на один запрос.

Суммарное время идентификации для полной комбинации признаков составляет в среднем 4–7 мин, причем основная часть времени затрачивается на этап предварительной обработки и разметки. Несмотря на то, что автоматизированная разметка позволит значительно сократить время обработки запроса, она не всегда может быть эффективна. В случае если исходные фото- и видеоматериалы материалы имеют низкое качество, помехи, специфические условия освещения или особенности самого биометрического признака, автоматизированная разметка может приводить к неточностям. В таких случаях необходимым шагом становится ручная обработка. Она позволяет убедиться в корректности извлеченных признаков, отсеять потенциальные ошибки, которые могли бы существенно повлиять на дальнейший поиск аналогов и итоговую идентификацию. Таким образом, экспертная оценка обеспечивает фундамент для надежной работы всей системы, даже если она занимает дополнительное время. Тем не менее оптимизация этого этапа является приоритетной задачей для дальнейшего повышения оперативности системы.

При практическом использовании системы в качестве баз данных известных лиц могут выступать базы данных, которые ведутся МВД и военными структурами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана автоматизированная экспертная система для поддержки принятия решений в судебно-медицинской идентификации личности по фото- и видеоматериалам. Ее ключевой особенностью является модульный подход, обеспечивающий гибкость, масштабируемость и возможность легкой интеграции новых аналитических алгоритмов.

Особое внимание уделено комплексному извлечению количественных и качественных биометрических признаков. Реализованы методы анализа уникальных характеристик красной каймы губ и ушной раковины, прогнозирования пола и расовой принадлежности на основе машинного обучения и статистических моделей. Анализ походки дополнительно обогащает систему динамическими биометрическими характеристиками и возможностью прогнозирования антропометрических данных.

Каждый специализированный аналитический модуль ориентирован на извлечение специфических признаков, что позволяет формировать исчерпывающий профиль индивида. Модуль поддержки принятия решений агрегирует эти данные, выполняет их взвешенное сопоставление с эталонными данными из базы данных известных лиц, ранжирует потенциальных кандидатов и формирует итоговое заключение либо в автономном режиме, либо предоставляя поддержку эксперту.

Предложенная разработка демонстрирует потенциал для существенного повышения объективности, точности и скорости процесса идентификации по фото- и видеоматериалам, автоматизируя трудоемкие этапы сравнения и снижая вероятность человеческой ошибки. Дальнейшее развитие системы может быть направлено на интеграцию новых биометрических модальностей и совершенствование алгоритмов машинного обучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смахтин Е.В. Применение систем видеофиксации в раскрытии и расследовании преступлений // *Алтайский юридический вестник*. 2017. № 1 (17). С. 137–141.
2. Доровин С.А. Роль и значение систем видеонаблюдения в охране

общественного порядка и раскрытию преступлений // *Концепт*. 2017. Т. 44. С. 254–256. URL: e-koncept.ru. (дата обращения: 14.06.2026).

3. Лютов В.С., Конушин А.С., Арсеев С.П. Распознавание человека по походке и внешности // *Программирование*. 2018. № 4. С. 97–106.

4. Martín-Félez R., Mollineda R.A., Sánchez J.S. Human recognition based on gait poses. *Iberian Conference on Pattern Recognition and Image Analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. P. 347–354.

5. Уздяев М.Ю., Яковлев Р.Н., Дударенко Д.М., Жебрун А.Д. Идентификация человека по походке в видеопотоке // *Известия Юго-Западного государственного университета*. 2020. № 24 (4). С. 57–75.

6. Cao Z., Hidalgo G., Simon T., Wei S.-E., Sheikh Y. OpenPose: realtime multi-person 2D poseestimation using part affinity fields // *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. 2021. V. 43 (1). P. 172–186.

7. Zakaria N.K., Tahir N.M., Jailani R. ASD Children Gait Classification Based On Principal Component Analysis and Linear Discriminant Analysis // *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020. V. 8 (6). P. 2438–2445.

8. Фомина Е.Е., Звягин В.Н., Галицкая О.И., Нарина Н.В., Усачева Л.Л. Программный комплекс для диагностики расовой принадлежности в судебно-медицинской и криминалистической практике // *Программные продукты и системы*. 2020. № 1. С. 154–161.

9. Фомина Е.Е., Звягин В.Н., Нарина Н.В., Усачева Л.Л. Программный комплекс для разметки и унифицированного описания лица индивида по фотоизображению // *Программные продукты и системы*. 2021. № 4. С. 660–666.

Для цитирования: Фомина Е.Е. Автоматизированная система поддержки принятия решений в задачах идентификации личности по визуальным данным // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2026. № 3 (31). С. 111–120.

AUTOMATED DECISION SUPPORT SYSTEM FOR PERSONALITY IDENTIFICATION TASKS USING VISUAL DATA

E.E. FOMINA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: f-elena2008@yandex.ru

The article presents an automated expert system for supporting decision-making in forensic medical identification of individuals using photo and video materials. The system is built on a modular principle, which ensures flexibility and the possibility of integrating new analytical algorithms. Special attention is given to the comprehensive extraction of both quantitative and qualitative biometric features, including analysis of the red border of the lips, the auricle, prediction of sex and racial affiliation, as well as gait analysis. Each module is focused on extracting specific features to form an individual profile. The decision support module aggregates data, performs weighted matching with a database of known individuals, and generates a final conclusion. The developed system enhances the objectivity, accuracy, and speed of identification by automating labor-intensive processes.

Keywords: automated system, decision support, identity verification, biometric identification, photographic materials, video materials.

Поступила в редакцию/received: 17.04.2026; после рецензирования/revised: 21.04.2026;
принята/accepted: 28.04.2026

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СО СВЕРХБОЛЬШИМ КОЛИЧЕСТВОМ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

С.Л. ГОРОБЧЕНКО¹, канд. техн. наук, В.А. СОКОЛОВА¹, канд. техн. наук,
Н.Н. ВЕРНЕР², канд. техн. наук, С.А. ВОЙНАШ³, ассистент,
С.В. АЛЕКСЕЕВА⁴, канд. техн. наук

¹Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий
и дизайна, 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18,
e-mail: sgorobchenko@yandex.ru

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
им. С.М. Кирова, 194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5,
e-mail: wernern@mail.ru

³Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы,
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6,
e-mail: sergeyvoinash@yandex.ru

⁴Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4,
e-mail: pum222@mail.ru

© Горобченко С.Л., Соколова В.А., Вернер Н.Н.,
Войнаш С.А., Алексеева С.В., 2026

Статья посвящена решению задачи прогнозирования для последовательностей, содержащих сверхбольшое количество временных рядов (до 300 тысяч и более) и характеризующихся нестационарностью, разнородностью и наличием сезонности.

Рассмотрена проблема выбора оптимальной методики прогнозирования на примере данных о продажах крупной распределительной сети. Проведен сравнительный анализ нескольких моделей временных рядов, реализованных в библиотеках языка Python (pmdarima, statsmodels, skforecast, statsforecast, sktime), включая ARIMA, SARIMA и их модификации с экзогенными факторами (ARIMAX, SARIMAX). Обоснован выбор наиболее эффективной модели SARIMAX на основе минимизации ошибки RMSE. Для повышения вычислительной эффективности при работе с массивами данных большого объема предложен подход, основанный на предварительной кластеризации рядов с использованием методов k-средних, метрик Евклида и DTW, а также оптимизации числа кластеров методами «локтя» и «силуэта». Показано, что прогнозирование на основе центроидов кластеров с последующей обратной нормировкой позволяет значительно сократить время вычислений без критической потери точности. Результаты работы подтверждают эффективность предложенного подхода для построения достоверных прогнозов в системах управления поставками.

Ключевые слова: временные ряды, прогнозирование, большие данные, кластеризация, экзогенные переменные, метод k-средних, машинное обучение, Python, оптимизация, анализ данных.

ВВЕДЕНИЕ

Среди множества видов временных рядов, которые встречаются в различных задачах анализа больших баз данных, выделяются последовательности со сверхбольшим количеством временных рядов [1–6]. Они могут обладать элементами

нестационарности, случайности, разной длительности, зависимости, иерархичности, сложности и наблюдаемости, переменностью и регулярностью структуры и мультикорреляции [7, 8].

Подобные характеристики делают задачу анализа и выработки прогноза достаточно сложной, поскольку предполагают необходимость изначальной обработки и предпрогнозного построения массива данных с применением разнообразных методик, таких как нелинейная динамика, определение оптимального объема выборки и группирование [9, 10]. Предобработанные массивы данных должны соответствовать выбору методики, которая в свою очередь должна отвечать особенностям самого массива данных [11].

Области данных, обладающих в основном числовым форматом и достаточно легко поддающихся цифровой обработке, лежат в сфере статистических и математических видов обработки больших данных. К ним можно отнести общестатистические и математические методы. К наиболее популярным, часто упоминаемым в литературе, относятся регрессионные и другие методы (АРПСС, SSA, SARIMA), а также различные виды спектрального анализа, разложения в ряды Фурье и преобразований (F-преобразование).

Выбор той или иной методики определяется возможностью получения достоверного и верифицируемого прогноза. В частности, необходимо исходить из метрики ряда (одномерный/многомерный) и требуемой точности, что определит выбор высокоточных или робастных методик. В связи с этим часто используются комплексные методы и методы гибридного моделирования.

Для решения задач обработки данных и прогнозирования для последовательностей со сверхбольшим количеством временных рядов, выражаемых в числовом формате, оптимально выбирать статистические методы. В работе демонстрируется выбор и применение статистических методов библиотеки Python для прогнозирования указанных последовательностей. Целью проведенного исследования является прогнозирование продаж крупной компании с распределенной торговой сетью с количеством рядов, превышающих 300 тысяч, и объемом данных в несколько десятков терабайт со сроком накопления данных свыше трех лет.

МЕТОДИКА ВЫБОРА МОДЕЛИ

Для работы с таким огромным массивом данных предварительно выберем наилучшую из стандартных моделей. Выбор будем осуществлять на меньшей компании с 917 рядами, априорно предполагая стационарность всех предоставленных рядов. Анализ стационарности проводится заранее исходя из общих соображений о характере компаний. Дополнительно на некоторой выборке проводятся тесты Квятковского – Филлипса – Шмидта – Шина, а также расширенный тест Дики – Фуллера и Филлипса – Перрона. Они должны подтвердить или опровергнуть предложенную гипотезу о стационарности рядов.

Выбор будем осуществлять из нескольких стандартных, имеющихся в библиотеках Python.

1. Модель AUTO-ARIMA из библиотеки pmdarima

Используем модель ARIMA (p, q), которая описывается равенством

$$y_t = a_1 y_{t-1} + \dots + a_p y_{t-p} + e_t + b_1 e_{t-1} + \dots + b_q e_{t-q}, \quad (1)$$

где a_i , b_i – параметры модели; e_t – гауссовский белый шум.

Опишем функцию AUTO-ARIMA из библиотеки `pmdarima`, что позволит провести выбор параметров модели.

1.1. AUTO-ARIMA

Функция AUTO-ARIMA стремится определить оптимальные параметры для ARIMA-модели. Чтобы найти наилучшую модель, AUTO-ARIMA оптимизирует для заданного информационного критерия его значение и возвращает ARIMA, которая минимизирует это значение (в качестве информационного критерия был выбран AIC). Кроме автоматического подбора параметров модели, преимущество AUTO-ARIMA состоит также в том, что она проводит дифференциальные тесты для определения порядка дифференцирования, в связи с чем постоянно анализируется и подтверждается стационарность исследуемых рядов.

1.2. График

В качестве прогноза AUTO-ARIMA было взято среднее значение по ряду. Визуальная оценка показывает, что ряд неудачный, поэтому был проведен переход к модели SARIMA.

2. Модель SARIMA из библиотеки `statsmodels`

Нетрудно заметить, что во временном ряду прослеживаются сезонные колебания с периодичностью в один год. Поэтому можно ожидать, что прогноз модели SARIMA, учитывающей сезонные колебания, будет лучше, чем прогноз модели AUTO-ARIMA. Необходимо подобрать параметры (p, d, q) и (P, D, Q) в модели SARIMA:

$$(p, d, q, P, D, Q, s = 52) \quad (2)$$

2.1. Optuna

Подбор параметров будем осуществлять с помощью библиотеки `optuna` в Python. Разобьем данные на две группы: обучающую выборку и тестовую, используя соотношения:

$$p, q \in \{0 \dots 4\} \quad d, D \in \{0 \dots 2\} \quad P, Q \in \{0 \dots 3\} \quad (3)$$

Обучающая выборка представляет собой начальный 80%-й отрезок ряда, а тестовая – оставшиеся 20 %. Обучая нашу модель на первой группе данных, с помощью `optuna` добиваемся минимизаций RMSE на оставшейся тестовой выборке, получая тем самым оптимальные значения:

2.2. График

При добавлении сезонности прогноз в достаточной степени реагирует на сезонные колебания, но плохо чувствует величину скачков.

3. Модель ARIMAX и SARIMAX из библиотеки `skforecast`

3.1. Построение экзогенной переменной

Заметим, что с 2021–2023 года в конце декабря и в начале января наблюдается сильное снижение продаж, поэтому в качестве экзогенных факторов в нашем случае возьмем новогодние праздники, а именно: выходные дни с 1 и 2 января и укороченные дни 31 декабря и с 3 по 7 января. Из-за того, что недельные данные с праздничными днями могут приходиться на разные недели, для построения экзогенного ряда каждый непраздничный и неукороченный день принимается за 1, праздничный – за 0, а укороченный – за 0,5, после чего проводится понедельное усреднение для получения требуемой экзогенной переменной.

3.2. Подбор параметров и графики

Для подбора параметров модели используем, как и в предыдущем пункте, обучающую и тестовую выборку продаж с тем же процентом (80 %) и библиотеку

optuna для минимизации RMSE. Отличие состоит лишь в том, что добавляется обучающая и тестовая выборки экзогенного ряда.

В отличие от моделей AUTO-ARIMA из библиотеки pmdarima и SARIMA из statsmodels, модель ARIMAX из skforecast уже учитывает экзогенные факторы, которые проявляются в виде просадки.

4. Модель ARIMAX из библиотеки statsforecast

Рассмотрим модель ARIMAX из библиотеки statsforecast. Ее функционал позволяет добавить сезонность, поэтому, учитывая прошлый опыт, будем сразу строить ее сезонную модификацию. Прodelав все то же самое, что и в случае модели SARIMAX из библиотеки skforecast, получим, что, в отличие от других SARIMA из ранее рассмотренных библиотек, сезонность выражена очень слабо. Из-за этого она похожа на обычную модель ARIMA с незначительным добавлением сезонности. Эта модель, очевидно, проигрывает модели SARIMAX из библиотеки skforecast как визуально, так и по метрике RMSE.

Сравнив между собой все указанные выше модели, можно признать наилучшей первую модель SARIMAX из библиотеки skforecast. Именно ее и будем использовать для дальнейшего прогноза.

5. Применение выбранной модели SARIMAX ко всему первому массиву временных рядов

Применив выбранную модель ко всем 917 рядам, получили, что первые два временных ряда, на которые прогноз лучше, похожи друг на друга визуально, а количество продаж товара на них выше, чем на двух следующих. Модель также «уловила» сезонное колебание среднего значения у ряда.

6. Кластеризация

6.1. Обработка данных

Предыдущие примеры показывают, что перед использованием выбранной модели желательно предварительно разбить временные ряды на «похожие», чтобы учесть их специфику, тем самым обеспечить возможность их кластеризации. Предварительно проведем обработку данных, удалив из 300 тысяч временных рядов те 180 тысяч, на графиках которых отсутствовали продажи за последние 4 месяца. В имеющихся временных рядах продаж относительно новых товаров пропуски в них дозаполним нулями, чтобы все временные ряды можно было рассматривать на одном и том же временном промежутке. Для того чтобы считать расстояние между рядами в выбранной метрике, предварительно проведем нормирование рядов. Это можно делать двумя способами: смещением на минимум и последующим делением временного ряда на максимум или последующей нормировкой на отрезке $[-1; 1]$.

6.2. Метод k-средних

Для кластеризации оставшихся 120 тысяч рядов после обработки воспользуемся методом k-средних. Метод заключается в следующем:

1. Выбирается число кластеров k .
2. Из исходного множества временных рядов случайным образом выбираются k , которые будут служить начальными центрами кластеров.
3. Для каждого из исходных временных рядов определяется ближайший к нему центр кластера (в выбранной метрике).
4. Проводится перевычисление центра каждого кластера с нахождением среднего между рядами в каждом кластере.
5. Проводится повторное разбиение рядов на кластеры в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе в выбранной метрике.

Выход из алгоритма осуществляется, если изменение расстояний между центрами незначительное или ограничивается количество итераций.

6.3. Оптимизация числа кластеров

Для того чтобы избежать «недообучения» или «переобучения», в алгоритме кластеризации необходимо подобрать оптимальное число кластеров. Для этого воспользуемся методами «локтя» и «силуэта».

6.3.1. Метод «локтя»

Метод применяется к алгоритму k-средних и заключается в том, что для каждого натурального числа k применяется метод k-средних, а далее вычисляется WCSS-метрика, равная сумме квадратов расстояний каждого временного ряда до его центра в кластере. Затем строится график зависимости значения WCSS от количества кластеров, затем ищется точка излома «локтя», которая и указывает на оптимальное количество кластеров.

6.3.2. Метод «силуэта»

Для каждого временного ряда в кластере вводится величина ширины силуэта S , которая вычисляется по формуле

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max(a(i), b(i))}, \quad (4)$$

где i – временной ряд, а $a(i)$ и $b(i)$ – среднее расстояние между временным рядом i и всеми остальными рядами в этом кластере и среднее расстояние между i и всеми остальными рядами из других кластеров соответственно.

Затем строится график зависимости среднего значения ширины силуэта рядов от количества кластеров и выбирается оптимальное значение k.

6.3.3. График метода «локтя» и метода «силуэта»

Применив указанные методы для евклидовой и DTW-метрики на меньшей компании, получили, что оба метода указывают на оптимальное значение k, примерно равное 24 в случае евклидовой метрики и 20 в случае метрики DTW.

Метод «локтя» для большей компании: оптимальное значение k составляет 36.

6.4. Кластеры

Для выбранного оптимального значения k, применив метод k-средних и взяв в качестве метрики евклидову и DTW-метрику, получим кластеризацию, показанную на рис. 1.

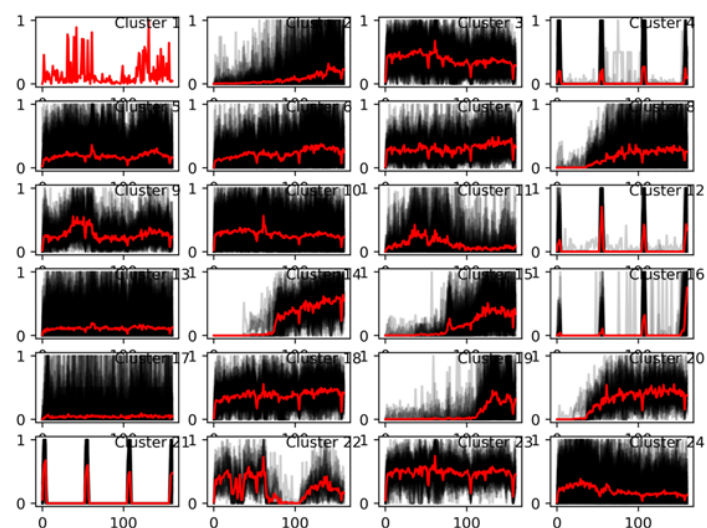
6.4.1. Прогноз

Взяв центроид в каждом кластере и применив для него выбранную нами модель SARIMAX, получим прогноз на кластер, который поднимается до прогноза на каждый отдельный элемент соответствующего класса обратной нормировкой.

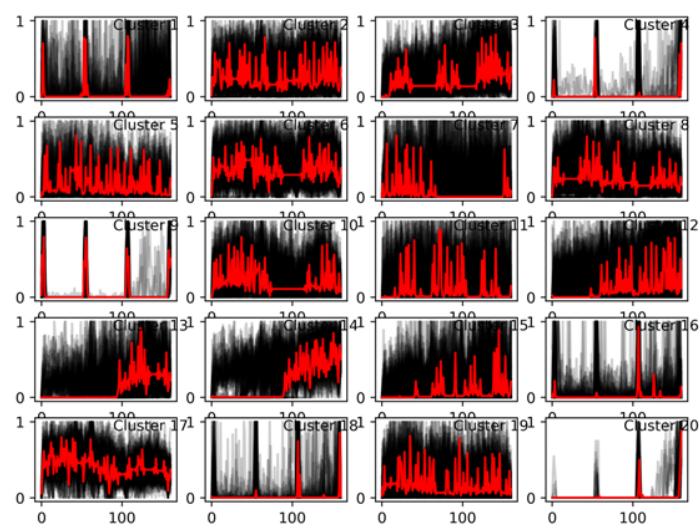
6.4.2. Векторный метод кластеризации

Рассмотрим векторный метод кластеризации временных рядов. Сопоставим каждому временному ряду вектор из 700 его параметров, а затем, применив метод k-средних к векторам параметров, получим кластеризацию по вектору и, соответственно, кластеризацию рядов, которые соответствуют данным векторам параметров.

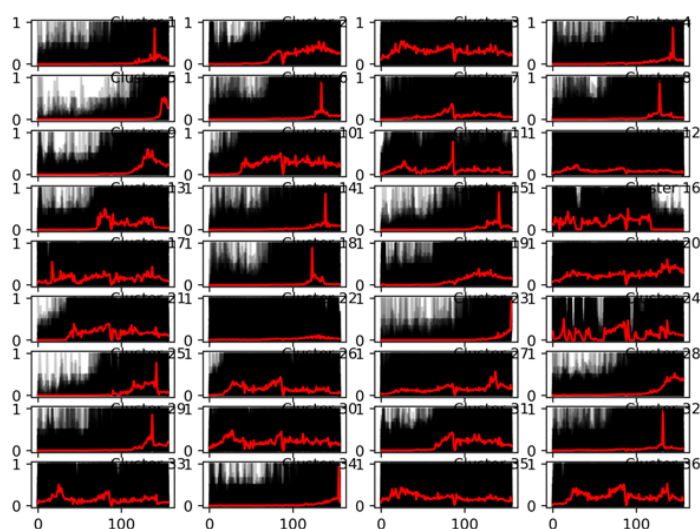
Сложность заключается в том, что для 300 тысяч рядов этот процесс весьма трудоемок, поэтому необходимо сократить размерность векторов параметров и счет (т.е. количество расчетов, которые проводятся на компьютере) может достигать до месяца на компьютерах средней мощности. Осуществим этот процесс с помощью метода главных компонент.



(a)



(б)



(в)

Рис. 1. Кластеризация для временных рядов большой компании с евклидовой метрикой:
(а)–(в) – этапы кластеризации (графиками изображены центры кластеров)

7. Результаты

Рассмотрены модели ARIMAX, SARIMAX, реализованные от разных библиотек Python. Установлена наилучшая модель для прогноза еженедельных продаж. Для работы с большими данными сгенерирован алгоритм, который ускоряет вычисление прогноза.

Проведем сравнение оценок при разном подходе к кластеризации временных рядов (рис. 2 и 3).

	Unnamed: 0	r2	rmse
count	110012.000000	1.100120e+05	110012.000000
mean	55005.500000	-5.559598e+01	4.913733
std	31757.873244	1.026420e+04	49.072667
min	0.000000	-3.033997e+06	0.020535
25%	27502.750000	-7.893860e-01	0.619812
50%	55005.500000	-2.128069e-01	1.023013
75%	82508.250000	-3.199674e-02	1.809221
max	110011.000000	7.045325e-01	4545.227650

Рис. 2. Распределение без учета новинок

	rmse		rmse
count	20565.000000	count	20355.000000
mean	14.256572	mean	8.855974
std	97.359820	std	60.257557
min	0.162232	min	0.000000
25%	1.754793	25%	1.075583
50%	2.807351	50%	1.745273
75%	4.679743	75%	3.474619
max	4097.407157	max	1917.837488

(а)

(б)

Рис. 3. Распределение с учетом новинок (а)
и предложенные компанией оценки, полученные с помощью прогноза
на каждом временном ряду (б)

Из представленных оценок следует, что оценки полученных прогнозов с помощью кластеризации незначительно ухудшают RMSE, но время прогнозирования при этом существенно сокращается. Такие модели могут использоваться в системе для прогноза поставок в точки продаж.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи нахождения решений для последовательностей со сверхбольшим количеством временных рядов по-прежнему остаются достаточно сложными и трудоемкими. Определяющим для этих целей можно считать выбор методики, который желательно проводить итерационным способом с расчетом отклика модели и ее верификацией по каждому варианту. Одним из важных моментов является разбиение общего объема выборки на рабочую и тестовую. Это дает возможность сравнивать результаты расчетов и моделирования на той же самой выборке. Полученные результаты позволяют спрогнозировать снижение затратности проведения расчетов, иметь достоверные и верифицируемые данные также и для расчета подобных выборок во многих областях техники и бизнеса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сотников А.И. Анализ временных рядов с использованием алгоритмов Big data // *Информационно-технологический вестник*. 2021. № 1 (27). С. 118–124.
2. Безрукавный Д.С. Анализ и управление данными в виде временных рядов: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2007. 115 с.
3. Тюнина Е.С. Методы анализа и прогнозирования временных рядов // *Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019: Сборник трудов II Международного научно-технического форума*. В 10 т. / под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань: ИП Коняхин А.В., 2019. Т. 4. С. 148–151.
4. Кричевский А.М. Прогнозирование временных рядов с долговременной корреляционной зависимостью: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2008. 179 с.
5. Сергеев А.В. Выявление и анализ тенденций временных рядов. *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. В 2 т. СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). 2019. Т. 1. С. 468–471.
6. Гончарова Н.Д., Терехова Ю.С. Анализ и моделирование статистических рядов: учебное пособие. Новосибирск: СибГУТИ, 2016. 97 с.
7. Зубов А.В., Зубов И.В., Зубов С.В., Стрекопытов И.С., Стрекопытова М.В. Аналитическая природа случайных последовательностей // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки*. 2010. № 3 (104). С. 84–89.
8. Zubov A.V., Zubov S.V. Vector of control observation, synthesis, number of entrances and exits, structure, aggregate, coefficient, multiple // *Middle Volga Mathematical Society Journal*. 2014. V. 16. № 1. P. 168–176.
9. Росенко А.П. Методика обработки массива данных, полученных экспертным путем // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2012. № 1-2 (25). С. 192–197.
10. Ташполатова Б.Б. Методы анализа случайных данных и их алгоритмизация. *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. 2018. В 2 т. СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). Т. 2. С. 521–524.
11. Рычка О.В. Сравнительный анализ методов интеллектуальной обработки данных и повышения качества прогнозных моделей // *Информатика и кибернетика*. 2023. № 2 (32). С. 36–42.

Для цитирования: Горобченко С.Л., Соколова В.А., Вернер Н.Н., Войнаш С.А., Алексеева С.В. Решение задачи прогнозирования для последовательностей со сверхбольшим количеством временных рядов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2026. № 3 (31). С. 121–129.

SOLVING THE FORECASTING PROBLEM FOR SEQUENCES WITH AN ULTRA-LARGE NUMBER OF TIME SERIES

S.L. GOROBCHENKO¹, Cand. Sc., V.A. SOKOLOVA¹, Cand. Sc.,
N.N. WERNER², Cand. Sc., S.A. VOINASH³, Assistant, S.V. ALEKSEEVA⁴, Cand. Sc.

¹Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design,
18, Bolshaya Morskaya St., Saint Petersburg, 191186, e-mail: sgorobchenko@yandex.ru

²Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov,
5, Institutsky Lane, Saint Petersburg, 194021, e-mail: wernern@mail.ru

³Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba,
6, Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, e-mail: sergeyvoinash@yandex.ru

⁴Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
4, 2-ya Krasnoarmeyskaya St., Saint Petersburg, 190005, e-mail: pum222@mail.ru

This article addresses the problem of forecasting sequences containing an extremely large number of time series (up to 300,000 or more) characterized by non-stationarity, heterogeneity, and seasonality. The problem of choosing the optimal forecasting method is considered using sales data from a large distribution network as an example. The study provides a comparative analysis of several time series models implemented in Python libraries (pmdarima, statsmodels, skforecast, statsforecast, sktime), including ARIMA, SARIMA, and their modifications with exogenous factors (ARIMAX, SARIMAX). The choice of the most effective SARIMAX model is justified based on minimizing the RMSE error. To improve computational efficiency when working with large data sets, an approach is proposed based on preliminary clustering of series using the k-means, Euclidean, and DTW methods, as well as optimizing the number of clusters using the elbow and silhouette methods. It is shown that forecasting based on cluster centroids followed by inverse normalization significantly reduces computation time without critically losing accuracy. The results confirm the effectiveness of the proposed approach for generating reliable forecasts in supply chain management systems.

Keywords: time series, forecasting, big data, clustering, exogenous variables, k-means method, machine learning, Python, optimization, data analysis.

Поступила в редакцию/received: 17.04.2026; после рецензирования/revised: 21.04.2026;
принята/accepted: 28.04.2026

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 3 (31), 2026**

Online ISSN 2687-0029

Редактор М.Б. Юдина
Корректор Ю.Ф. Воробьева

Дата выхода в свет 25.08.2026

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22