

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
№ 4 (28), 2025**

**Print ISSN 2658-5030
Online ISSN 2687-0029**

Тверь 2025

Учредитель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»

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

Заместители главного редактора:

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

Яблонев А.Л., д.т.н., профессор ТвГТУ

Семенов Н.А., д.т.н., профессор ТвГТУ

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

Члены редакционной коллегии:

По направлению «Машиностроение»

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

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

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

Палюх Б.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Шпрехер Д.М., д.т.н., профессор ТулГУ

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

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

E-mail: vestnik_tstu_tekh@mail.ru

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: ПИ № ФС77-74321 от 19 ноября 2018 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> О корреляции механической и электроэррозионной износостойкости сплава NiCrBSi	5
<i>Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В.</i> Оценка структуры и величины размагничивающих полей в магнитопассивных подшипниках.....	12
<i>Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> О параметрах микрорельефа поверхности металла после электроэррозионной резки.....	21

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

<i>Лобачева Л.В.</i> Обоснование технологии консервации породных отвалов бурого угля с целью комплексного освоения и сохранения ресурсного потенциала недр.....	29
<i>Бухтеев О.М.</i> Применение цифровых моделей для совершенствования процесса эксплуатации и диагностики дизельных двигателей погрузочно-доставочных машин.....	38
<i>Данилов А.С., Кремчеев Э.А., Магдеева Н.М.</i> Перспективы использования сапонитсодержащих отходов.....	45

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

<i>Клюшин А.Ю.</i> Эффекты применения гибридной интеллектуальной системы на транспорте для повышения безопасности дорожного движения.....	64
<i>Клюшин А.Ю.</i> Инструментарий адаптивного управления транспортными потоками в интеллектуальных транспортных системах.....	72
<i>Виноградов Г.П., Кирсанова Н.В.</i> Архитектура модели агента с автономным поведением.....	82
<i>Торшин С.В., Капитанов А.В.</i> Поддержка принятия управлеченческих решений в задачах оперативного планирования производственного персонала на основе теории нечетких множеств.....	90
<i>Бурдо Г.Б., Лебедев С.Н., Лебедева Ю.В., Лебедев И.С.</i> Опыт применения экспертных систем поддержки принятия решений при диагностике заболеваний слизистой оболочки полости рта.....	98

НОВОЕ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ

<i>Горлов И.В., Полетаева Е.В.</i> Развитие системы автоматизированного проектирования технологических процессов «ВЕРТИКАЛЬ» компании «АСКОН».....	107
--	-----

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V.</i> On the correlation of mechanical and electroerosive wear resistance of NiCrBSi alloy.....	5
<i>Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V.</i> Evaluation of the structure and magnitude of demagnetizing fields in magnetic bearings.....	12
<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V.</i> On the parameters of the microrelief of the metal surface after electric discharge wire cutting.....	21

SUBSOIL USE AND MINING SCIENCES

<i>Lobacheva L.V.</i> Justification of technology of conservation of brown coal waste dumps for purpose of comprehensive development and preservation of resource potential of subsoil.....	29
<i>Bukhteev O.M.</i> The application of digital models to improve the operation and diagnostics process of diesel engines in load-haul-dump machines.....	38
<i>Danilov A.S., Kremcheev E.A., Magdeeva N.M.</i> Prospects for the use of saponite-containing waste.....	45

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

<i>Klyushin A.Yu.</i> Effects of using a hybrid intelligent system in transport to improve road safety.....	64
<i>Klyushin A.Yu.</i> Methods and tools for adaptive transport flow management in transport systems.....	72
<i>Vinogradov G.P., Kirsanova N.V.</i> The architecture of the agent model with autonomous behavior.....	82
<i>Torshin S.V., Kapitanov A.V.</i> Support for making management decisions in the problems of operational planning of production staff based on the theory of fuzzy sets.....	90
<i>Burdo G.B., Lebedev S.N., Lebedeva Yu.V., Lebedev I.S.</i> The experience of using expert decision support systems in the diagnosis of diseases of the oral mucosa.....	98

NEW IN ENGINEERING EDUCATION

<i>Gorlov I.V., Poletaeva E.V.</i> Development of ASCON company's CAD/CAM Vertical...	107
---	-----

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.891+537.523

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-5-12

О КОРРЕЛЯЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СПЛАВА NiCrBSi

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

© Измайлова В.В., Новоселова М.В., 2025

Приведены сравнительные экспериментальные данные по электроэрозионной и механической (абразивной) износостойкости порошкового композиционного сплава NiCrBSi, определены его твердость и удельное электросопротивление. Эксперименты выявили корреляцию характеристик электроэрозионного и абразивного изнашивания, отмечавшуюся в литературе и наблюдавшуюся авторами ранее для композиционных материалов на основе меди, также для исследованных образцов данного материала. Удельное электросопротивление никелевого сплава в десятки раз превышает удельное электросопротивление меди и сравнимо с удельным электросопротивлением хромоникелевых нержавеющих сталей или серых чугунов, которые используются в скользящих электрических контактах «щетка – кольцо». Характеристики механической износостойкости соответствуют 6–7-му классу износостойкости из 13 возможных, что является средним результатом. Электроэрозионная износостойкость исследованного никелевого сплава также невысока и сравнима с износостойкостью меди.

Ключевые слова: никелевый сплав, плазменная наплавка, твердость, удельное электросопротивление, механическая и электроэрозионная износостойкость, корреляция.

ВВЕДЕНИЕ

Данная статья логически продолжает предыдущую работу авторов [1], в которой рассматривается корреляция механической и электроэрозионной износостойкости электроконтактных материалов на основе меди. Приводятся результаты исследования износостойкости перспективного материала – порошкового никелевого сплава состава NiCrBSi [2]. Данный материал широко используется в настоящее время для восстановления изношенных деталей машин и во многих случаях характеризуется коррозионной стойкостью, а также механической износостойкостью в условиях адгезионного, абразивного и фреттинг-изнашивания [3–7]. При этом электроэрозионная износостойкость данного материала практически не исследована. Цель данной работы – экспериментальное исследование электроэрозионного изнашивания сплава NiCrBSi и сопоставление характеристик его электроэрозионной износостойкости с аналогичными характеристиками в режиме механического изнашивания.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись образцы покрытия из порошкового сплава NiCrBSi на подложке из алюминиевой бронзы БрА9Ц8Н15, полученные плазменной наплавкой. Технология и режимы наплавки описаны в работе [2]. Испытания на

механическое и электроэррозионное изнашивание проводили на трех образцах исследуемого материала, полученных при различных значениях тока сварочной дуги: 66 А (образец № 1), 83 А (образец № 2) и 94 А (образец № 3). Для сравнения таких различных по своему механизму видов изнашивания, как механическое и электроэррозионное, удобно использовать относительные характеристики, приняв некоторый материал за эталон. В данном исследовании таким эталоном был выбран типичный электроконтактный материал – медь марки М1 (образец № 4).

Так как электроэррозионная износостойкость представляет интерес прежде всего с точки зрения использования материала в качестве электроконтактного, помимо величины износа дополнительно определяли такие физико-механические свойства исследуемого материала, как твердость и удельное электросопротивление.

Микротвердость HV определяли согласно ГОСТ 9450-76 при нагрузке на индентор 1,96 Н, твердость индентирования H_{IT} – согласно ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002) при нагрузках на индентор 90 и 180 Н.

Удельное сопротивление сплава NiCrBSi определяли известным четырехзондовым методом, схема которого показана на рис. 1. Зонды 1 и 4 подключаются к источнику постоянного тока, зонды 2 и 3 – к милливольтметру, который измеряет разность потенциалов U_{23} при известной силе тока I_{14} . Удельное электросопротивление рассчитывали по формуле

$$\rho = 2\pi S \frac{U_{23}}{I_{14}},$$

где S – расстояние между зондами (в нашем случае $S = 1$ мм).

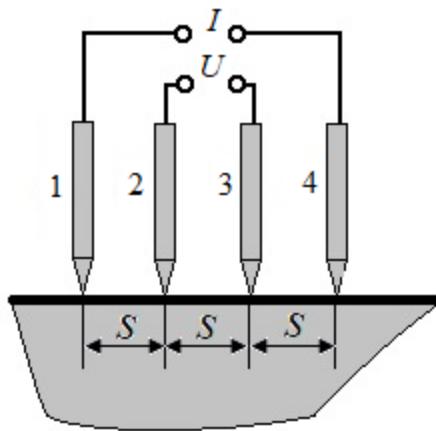


Рис. 1. Схема измерения удельного электросопротивления

Для оценки электроэррозионной износостойкости исследуемого материала в режиме импульсного разряда использовалась установка, схема рабочего узла которой приведена на рис. 2а.

Разряд возникает при периодическом замыкании и размыкании контакта цилиндрического вольфрамового электрода 1 диаметром 1 мм с образцом 2 из исследуемого материала, зафиксированным на латунном основании 3 прижимной пластиной 4 с центральным отверстием. Основание расположено на шпинделе 5, который перемещается в вертикальном направлении микрометрическим винтом, что позволяет регулировать как зазор контакта, так и контактное нажатие. Электрод вместе с

держателем 6 совершают возвратно-поступательные перемещения в вертикальной плоскости от механического привода, обеспечивающего частоту коммутаций (число циклов «замыкание – размыкание») $n_u = 20 \text{ мин}^{-1}$.

Зазор контакта равен 7 мм, продолжительность включения – 50 %. Контактное нажатие 0,5 Н, постоянное во всех экспериментах, обеспечивалось с помощью разновесов, помещаемых на держатель электрода. Импульсный разряд в контакте создавался с помощью емкостного накопителя энергии, величина коммутируемого заряда $Q \approx 66 \text{ мКл}$.

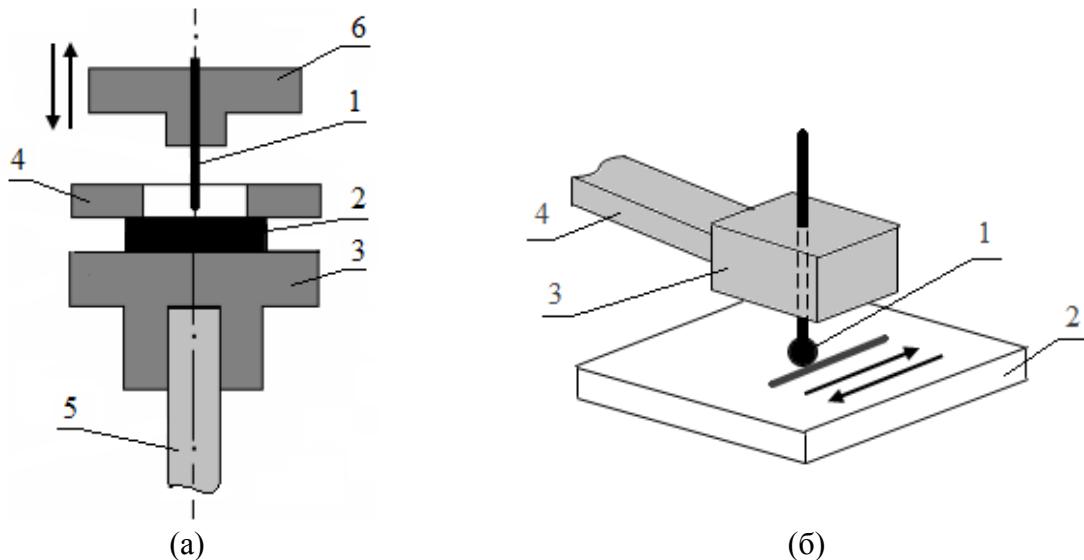


Рис. 2. Схемы рабочих узлов установок для испытаний материалов на изнашивание: электроэррозионное (а); механическое (абразивное) (б)

После испытаний измеряли линейный износ образцов, т. е. уменьшение длины вольфрамового электрода и глубину лунки на образце из исследуемого материала. Точность измерений 0,01 мм. В качестве характеристик электроэррозионной износстойкости используют объемную и массовую эрозию в расчете на один цикл коммутации, объемную и массовую эрозию в расчете на единицу коммутируемого заряда Q и другие величины. В данной работе мы использовали в качестве характеристики электроэррозионной износстойкости линейный износ за один цикл коммутации i_{he} – величину, аналогичную такой же характеристике для механического изнашивания. Линейная i_{he} и объемная i_{Ve} величины эрозии за один цикл связаны очевидной функциональной зависимостью:

$$i_{he} = \frac{i_{Ve}}{\pi r^2},$$

где r – радиус лунки, практически равный радиусу электрода. Объемную эрозию в расчете на единицу коммутируемого заряда i_Q в свою очередь легко вычислить по величине объемной эрозии за один цикл коммутации:

$$i_Q = \frac{i_{Ve}}{Q},$$

где Q – величина коммутируемого заряда.

Для оценки механической износостойкости материала NiCrBSi применяли метод испытаний на абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы по схеме шар – плоскость (см. рис. 2б). В качестве шарового контробразца использовали стальной сферический наконечник диаметром 1 мм с алмазным напылением, размер алмазного зерна составлял 40...50 мкм. К контакту прикладывали нагрузку в 0,5 Н. Износостойкость определяли в процессе возвратно-поступательных движений шарового контробразца 1 по плоской поверхности исследуемого образца 2. Тангенциальные возвратно-поступательные перемещения контробразца, закрепленного в обойме 3, сопряженной с электромеханическим приводом 4 с питанием от генератора импульсов, происходили с частотой 20 Гц. За один цикл путь трения составлял 5 мм. Длительность испытания составляла 20 мин.

Износостойкость материала, полученного порошковой плазменной наплавкой, значительно отличается по ширине наплавки (т. е. в центральной части и ближе к внешнему краю валика наплавленного материала) [8], поэтому в данных экспериментах канавки изнашивания располагали перпендикулярно валику наплавки.

После испытаний проводили профилометрирование канавок изнашивания. По поперечным профилограммам измеряли глубину канавки изнашивания. Затем рассчитывали характеристики изнашивания исследуемого покрытия. Для характеристики механической износостойкости использовали стандартные параметры по ГОСТ 27674-88: линейную I_h и объемную I_V интенсивности изнашивания, среднюю скорость изнашивания v , а также нестандартные параметры: линейный износ за цикл i_h ; безразмерный коэффициент износа k и объемную интенсивность изнашивания в расчете на единицу нормальной нагрузки (размерный коэффициент износа) [9]. Последние два параметра фигурируют в известном в трибологии уравнении Арчарда:

$$I_V = \frac{V}{L} = k \frac{N}{H},$$

где V – объем изношенного материала; L – путь трения; N – нормальная нагрузка на контакт; H – твердость (микротвердость) более мягкого материала пары трения. Отношение $k / H = I_V / N$ называют размерным коэффициентом износа [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристики твердости исследуемого материала (сплава NiCrBSi) и меди М1 как эталона представлены в табл. 1. Сплав NiCrBSi обладает значительной твердостью, которая практически не зависит от нагрузки на индентор, по крайней мере в диапазоне 2...200 Н.

Таблица 1. Характеристики твердости исследованных материалов

Микротвердость HV , МПа	Твердость индентирования H_{IT} , МПа	
Сплав NiCrBSi	Сплав NiCrBSi	Медь М1
$5\ 300 \pm 60$	$5\ 414 \pm 318$	737 ± 21

Для удельного электросопротивления сплава NiCrBSi получено значение $\rho = 0,92 \pm 0,13 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, которое существенно превышает удельное сопротивление меди ($0,018 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$), однако это не исключает возможности применения данного материала в электроконтактных соединениях. Его удельное электросопротивление сравнимо, например, со значениями удельного электросопротивления хромоникелевых нержавеющих сталей ($\rho \approx 0,7\ldots1,0 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$), применяемых, в частности, для

изготовления контактных колец в средне- и тяжелонагруженных скользящих электроконтактных соединениях, или с удельным сопротивлением серого чугуна ($\rho = 0,4 \dots 1,2 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$), используемого для этих же целей [10, 11].

Характеристики механического и электроэрозионного износа исследованных образцов приведены в табл. 2. По величине механической износостойкости в условиях абразивного изнашивания образцы исследуемого никелевого сплава относятся к 6–7-му классу из 13, что является средним результатом. Полученные нами сравнительно невысокие оценки износостойкости исследуемого сплава согласуются с результатами работ [4–6], в которых для аналогичного никелевого сплава в режиме абразивного изнашивания получены значения линейной интенсивности изнашивания $I_h \sim 10^{-5}$ (4–5-й класс износостойкости). Возможные причины невысокой фрикционной износостойкости данного материала приводятся в работе [7]. В нашем случае это может объясняться неоптимальными технологическими режимами получения покрытия. Для сравнения, аналогичное по составу покрытие, полученное с помощью лазерных технологий, при испытаниях по аналогичной методике показало износостойкость на порядок выше (линейная интенсивность изнашивания I_h порядка 10^{-8}) [12].

Значения безразмерного коэффициента изнашивания k для исследованного материала близки к соответствующим значениям для инструментальных сталей и примерно на порядок больше, чем для нержавеющих сталей [9].

По абсолютным значениям электроэрозионной износостойкости исследуемый никелевый сплав примерно в два раза уступает композиционному электроконтактному материалу на основе меди с добавлением тугоплавких компонентов, испытанному по аналогичной методике [1].

Характеризуя электроконтактные свойства сплава NiCrBSi, помимо повышенного удельного электросопротивления необходимо отметить склонность исследуемого материала к свариванию контакта, выявленную в процессе наших экспериментов. Этот недостаток отмечается и для других сплавов никеля [9].

Таблица 2. Характеристики механического и электроэрозионного износа

Образец		Механическое изнашивание					Электрическая эрозия i_{he} , мкм/цикл
		$I_h, 10^{-7}$	$I_V, 10^{-14} \text{ м}^2$	$k, 10^{-4}$	$k / H, 10^{-8} \text{ МПа}^{-1}$	$i_h, \text{нм/цикл}$	
NiCrBSi	№ 1	0,72	3,30	3,57	6,60	0,79	4,00
	№ 2	0,83	3,65	3,95	7,29	0,88	3,38
	№ 3	1,61	7,12	7,71	14,2	1,71	6,25
Cu	№ 4	2,50	6,67	0,98	13,3	1,33	6,72

На рис. 3 представлены относительные величины механического и электроэрозионного износа испытанных образцов. В целом отмеченная в литературе [13, 14] и подтвержденная нами в статье [1] тенденция к корреляции механической и электроэрозионной износостойкости материалов наблюдается и в данном случае, хотя и не так явно, как в случае материала на основе меди с добавками тугоплавких материалов.

Сопоставление относительных характеристик механического и электроэрозионного изнашивания (относительно меди), представленное на рис. 4, подтверждает этот вывод.

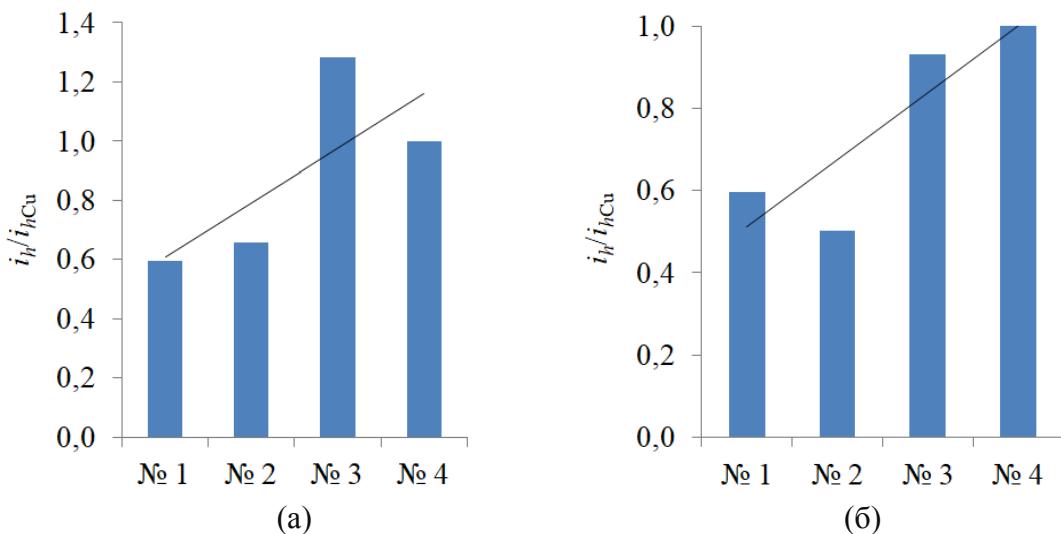


Рис. 3. Относительные величины износа: механического (а); электроэрозионного (б). Линия – тренд

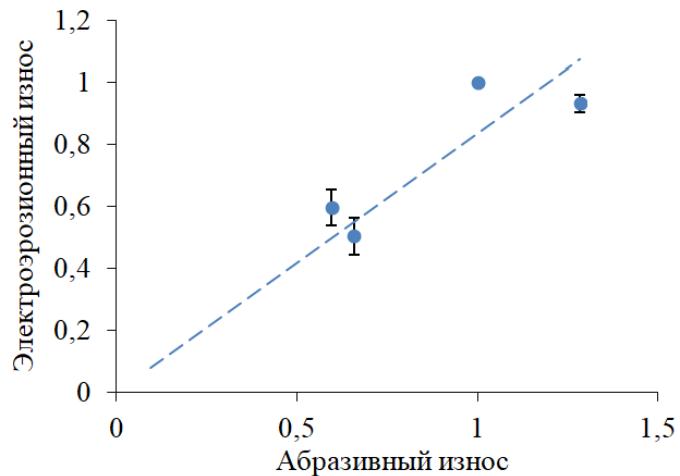


Рис. 4. Сравнение относительных величин износа сплава NiCrBSi:
• – экспериментальные данные; пунктирная линия – аппроксимация

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные испытания на механическую (абразивную) и электроэрозионную износостойкость композиционного порошкового сплава NiCrBSi подтвердили сделанный нами ранее вывод о корреляции параметров этих видов изнашивания по результатам исследования композиционных сплавов на основе меди. По абсолютным значениям абразивной и электроэрозионной износостойкости данный материал показал средние результаты: линейная интенсивность механического изнашивания имеет порядок 10^{-7} (6–7-й класс износостойкости), электроэрозионного – 12–26 нм/Кл, что сравнимо с износостойкостью меди (~ 20 нм/Кл). В процессе испытаний на электроэрозионную износостойкость наблюдались случаи сваривания контакта.

Результаты испытаний свидетельствуют о влиянии на характеристики износостойкости режимов плазменной наплавки, в частности тока сварочной дуги, поэтому в качестве направления дальнейших исследований можно рекомендовать поиск оптимальных режимов наплавки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность заведующему лабораторией кафедры прикладной физики ТвГТУ Сахарову К.А. за помощь в подготовке образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов В.В., Новоселова М.В. О сочетании электроэррозионной и механической износостойкости материалов для коммутирующих электроконтактных соединений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 5–12.
2. Сахаров К.А., Афанасьева Л.Е. Плазменная порошковая наплавка износостойкого покрытия. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: Межвуз. сборник научных трудов / отв. ред. В.В. Измайлов*. Тверь: ТвГТУ, 2024. Вып. 17. С. 88–93.
3. Balaguru S., Gupta M. Hardfacing studies of Ni alloys: A critical review // *Journal of materials research and technology*. 2021. V. 10. P. 1210–1242.
4. Соболева Н.Н., Малыгина И.Ю., Осинцева А.Л., Поздеева Н.А. Влияние микроструктуры и фазового состава на трибологические свойства NiCrBSi лазерных покрытий // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 4 (3). С. 869–873.
5. Makarov A.V., Korobov Y.S., Soboleva N.N., Khudorozhkova Y.V., Vopneruk A.A., Balu P., Stepchenkov A.K. Wear-resistant nickel-based laser clad coatings for high-temperature applications // *Letters on Materials*. 2019. № 9 (4). Р. 470–474.
6. Соболева Н.Н., Макаров А.В., Малыгина И.Ю. Упрочняющая фрикционная обработка NiCrBSi лазерного покрытия // *Обработка металлов*. 2013. № 4 (61). С. 79–85.
7. Токарев А.О., Макагон Л.Д. Оценка износостойкости и триботехнических свойств плазменно-напылённых покрытий // *Научные проблемы водного транспорта*. 2021. Вып. 69. С. 95–108.
8. Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е. Абрзивная износостойкость хромоникелевого наплавленного покрытия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 3 (27). С. 34–41.
9. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: Физматлит. 2007. 368 с.
10. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. 560 с.
11. Кончиц В.В., Мешков В.В., Мышкин Н.К. Триботехника электрических контактов. Минск: Наука и техника, 1986. 256 с.
12. Раткевич Г.В. Повышение износостойкости поверхностей трения модифицированием структуры сплавов лазерным излучением: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2021. 137 с.
13. Берент В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2005. 408 с.
14. Берент В.Я. Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем). Ногинск: Аналитика Родис, 2016. 328 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. О корреляции механической и электроэррозионной износостойкости сплава NiCrBSi // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 5–12.

ON THE CORRELATION OF MECHANICAL AND ELECTROEROSIVE WEAR RESISTANCE OF NiCrBSi ALLOY

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

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

Comparative experimental data on the electrical erosion and abrasive wear resistance of the NiCrBSi powder composite alloy are presented, and its hardness and specific electrical resistance are determined. The experiments revealed a correlation between the characteristics of electrical erosion and abrasive wear for the studied samples of this material, which was noted in the literature and observed by the authors earlier for copper-based composite materials. The specific electrical resistance of the material of the studied nickel alloy samples is tens of times higher than the specific electrical resistance of copper and is comparable to the specific electrical resistance of chromium-nickel stainless steels or gray cast irons, which are used in brush-ring sliding electrical contacts. The characteristics of mechanical wear resistance correspond to 6th or 7th wear resistance class out of 13 possible, which is a middling result. Electrical erosion wear resistance of the studied nickel alloy is also moderate and is comparable to the wear resistance of copper.

Keywords: nickel alloy, plasma surfacing, hardness, specific electrical resistance, mechanical and electrical erosion wear resistance, correlation.

Поступила в редакцию/received: 27.05.2025; после рецензирования/revised: 02.06.2025;
принята/accepted: 05.06.2025

УДК 621.82

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-12-21

ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ И ВЕЛИЧИНЫ РАЗМАГНИЧИВАЮЩИХ ПОЛЕЙ В МАГНИТОПАССИВНЫХ ПОДШИПНИКАХ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, О.О. НОВИКОВА, канд. техн. наук,
В.В. НОВИКОВ, канд. техн. наук

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

© Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В., 2025

В статье проведен анализ величины и топографии размагничивающих полей для отталкивающихся постоянных редкоземельных магнитов и выработан общий аналитический подход к описанию силовых свойств магнитов магнитопассивных подшипников. Изучены причины, приводящие к снижению магнитных свойств в пассивных магнитных подшипниках. Установлено, что основными причинами являются температурные поля, механические напряжения, внешние и внутренние размагничивающие магнитные поля. Проведен расчет внешнего и внутреннего размагничивающих полей для элементарной магнитной системы магнитопассивного подшипника, состоящей из двух соосно расположенных магнитов различной формы.

Применяя результаты работы, можно определить оптимальные размеры различных по форме магнитов для магнитопассивных подшипников.

Ключевые слова: магнитосиловые устройства, магнитопассивные подшипники, размагничивающие магнитные поля, коэрцитивная сила, намагниченность.

ВВЕДЕНИЕ

Бесконтактные магнитные и электромагнитные механизмы с постоянными магнитами начинают все более широко использоваться в современном высокотехнологичном станкостроении, приборостроении, нефтегазовой промышленности, аэрокосмическом и транспортном машиностроении [1–6].

Активное создание механизмов с магнитной связью – муфт, редукторов, подшипников, пружин, электрических генераторов и двигателей, фиксирующих устройств [7–9] началось во второй половине прошлого века после создания двух классов новых магнитожестких материалов на основе редкоземельных химических элементов [10], которые характеризуются высоким значением удельной магнитной энергии в сочетании с большой остаточной намагниченностью и коэрцитивной силой. Для магнитосиловых устройств (муфт, подшипников, пружин) значение остаточной намагниченности важно потому, что в этих устройствах используются магнитные силы, возникающие при взаимодействии магнитов между собой или с ферромагнетиками, которые пропорциональны остаточной намагниченности во второй степени. Высокое значение коэрцитивной силы магнитожестких редкоземельных материалов позволяет эксплуатировать их в более широком диапазоне собственных и внешних размагничивающих магнитных полей.

Выделяют два класса редкоземельных магнитов [10]: на основе сплава самария и кобальта (самарий-кобальтовые магниты) и сплава, содержащего неодим, железо и бор (магниты типа фенебор). Магниты группы Sm–Co имеют остаточную индукцию 0,7...0,95 Тл, температурный коэффициент обратимых изменений остаточной намагниченности 0,035...0,045 %/°C и диапазон изменения рабочих температур от –70 до 300 °C. Магниты и сплавы Sm–Co обладают стойкостью к агрессивным средам, радиационному воздействию и способны эффективно работать в широком диапазоне температур; магниты достаточно прочны и могут использоваться в условия действия больших инерционных сил.

Остаточная индукция магнитов группы Nd–Fe–B существенно выше: 1...1,35 Тл, однако температурный коэффициент у них больше – 0,07...0,13 %/°C, а диапазон рабочих температур уже: –60...180 °C. Магниты Nd–Fe–B дешевле, но имеют низкую коррозионную стойкость и, как правило, требуют нанесения специальных защитных покрытий. Заметим, что ферритовые магниты, имевшие широкое распространение до появления редкоземельных магнитов, характеризуются остаточной индукцией не более 0,4 Тл и температурным коэффициентом 0,2 %/°C.

Магнитопассивные подшипники – автономно работающие трибоузлы, в которых износ труящихся деталей существенно снижен за счет компенсации нормальной нагрузки магнитными силами, – хорошо зарекомендовали себя в технических устройствах. Применение современных магнитов на основе редкоземельных элементов в магнитопассивных подшипниках позволило существенно повысить их эффективность за счет увеличения жесткости и несущей способности.

В зависимости от конструкции узла трения для магнитной разгрузки могут применяться магниты различных форм, возможно применение магнитной сборки Хальбаха из магнитов с разнонаправленной намагниченностью [11]. При проектировании современного магнитопассивного подшипника необходимо учитывать, что на силовые характеристики магнитов оказывает влияние внутреннее размагничивающее

поле, а также неоднородное размагничивающее поле от сопряженных магнитов. В результате непреднамеренного размагничивания постоянных магнитов возможно нарушение функциональных свойств магнитного подшипника, приводящее к значительному возрастанию трения в трибоузле. Для рационального выбора конструкции магнитопассивного трибоузла необходимо учитывать структуру и величину магнитных полей, возникающих в магнитных материалах приложении эксплуатационных нагрузок. Однако четкие рекомендации по выбору материалов для силовых устройств с постоянными магнитами, в которых учтены возможные необратимые изменения намагниченности, в настоящее время отсутствуют. При разработке таких рекомендаций следует принимать во внимание коэрцитивную силу магнитного материала при заданной температуре, форму кривой размагничивания и геометрические параметры магнитной цепи.

Цель работы заключалась в анализе величины и топографии размагничивающих полей для отталкивающих постоянных магнитов, выполненных из редкоземельных химических элементов, и выработке общего аналитического подхода к описанию силовых свойств магнитов магнитопассивных подшипников.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ МАГНИТОВ В ПАССИВНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКАХ

Рассмотрим причины, приводящие к ухудшению свойств магнитов в пассивных магнитных подшипниках. В основном любой магнитопассивный подшипник можно разбить на пары взаимодействующих между собой магнитов, поэтому для прогнозирования работоспособности подшипника в целом достаточно рассмотреть стабильность магнитных свойств магнитов, составляющих такую элементарную магнитную систему. Под работоспособностью подшипника в данном конкретном случае подразумевается способность магнитов создавать необходимые аксиальные и радиальные магнитные силы во всем диапазоне смещений вала, на котором они закреплены.

Для примера на рис. 1 показана магнитная система упорного магнитного подшипника, которая состоит из двух соосно расположенных магнитов цилиндрической формы с радиусами R_1 и R_2 и высотой h_1 и h_2 . Для компенсации внешних осевых сил, действующих на подшипник, магниты имеют противоположную осевую намагниченность.

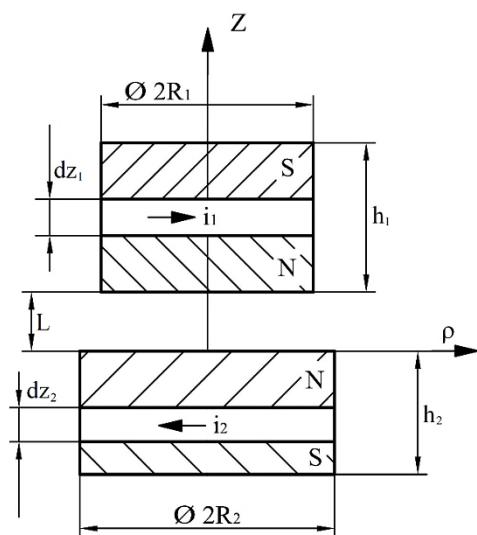


Рис. 1. Схема расположения постоянных магнитов в подшипнике

Будем полагать, что в подшипник установлены высококоэрцитивные промышленные магниты на основе редкоземельных элементов, основные свойства которых, а также стоимость по состоянию на 2025 год приведены в табл. 1.

Таблица 1. Магнитные свойства промышленных постоянных магнитов

Марка магнита	B_r , Тл	H_{cB} , кА/м	H_{cJ} , кА/м	W_{max} , кДж/м ³	Максимальная рабочая температура, °С	Цена за 1 кг, тыс. руб.
КС-37	0,77	540	1 300	55,0	300...350	15...30
КС-37А	0,82	560	1 000	65,0		
КСП-37	0,85	520	800	65,0		
КСП-37А	0,90	500	640	72,5		
N48	1,38...1,42	836...891	>955	366...390	80	4,5...9,0
N48M	1,38...1,44	1 019...1 114	>1 114	366...398	100	
N45H	1,33...1,39	>923	>1 353	342...366	120	
N45SH	1,33...1,39	>923	>1 592	342...366	150	
N35UH	1,17...1,22	836...891	>1 990	263...279	180	
N33EH	1,14...1,17	820...876	>2 388	247...263	200	

Примечание. B_r – остаточная индукция; H_{cB} , H_{cJ} – коэрцитивная сила по индукции и намагниченности; W_{max} – максимальная магнитная энергия.

Характерная для современных магнитотвердых материалов кривая размагничивания по намагниченности J представлена на рис. 2. Вначале, по мере возрастания напряженности размагничивающего поля H наблюдается линейный участок J_r –Е, который характеризуется незначительным обратимым уменьшением остаточной намагниченности. Далее на кривой размагничивания происходит снижение намагниченности вдоль «пятки» Е–С, после чего на участке С– H_{cJ} материал магнита полностью размагничивается. Точка Е на кривой размагничивания соответствует значению напряженности критического поля H_k , выше которого наблюдается необратимое уменьшение намагниченности магнитов.

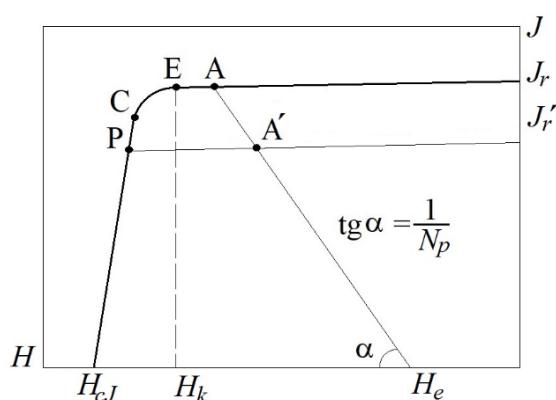


Рис. 2. Обобщенная кривая размагничивания магнита

Для оценки эффективности работы магнитопассивных подшипников необходимо задать намагниченность материалов постоянных магнитов в реальных условиях их эксплуатации. Для определения намагниченности магнитов заданной формы и конечных размеров требуется знать внутреннее размагничивающее магнитное поле, которое в свою очередь сложным образом зависит от остаточной намагниченности, а также от формы и геометрических размеров магнитов [12].

На рис. 3 показан цилиндрический магнит, имеющий однородную намагниченность J , направленную параллельно оси магнита. На торцевых поверхностях магнита наблюдается скачок вектора намагниченности от значения J в магните до нуля на внешней поверхности. В результате на поверхностях образуются фиктивные магнитные заряды, которые являются источником внутреннего магнитного поля, направленного противоположно намагниченности J и называемого поэтому размагничивающим полем H_p . Это поле является однородным только внутри крайне редко используемых магнитов в виде эллипсоидов. Для последующих расчетов будем использовать среднее значение собственного размагничивающего поля по нейтральному сечению магнита (сечение А–А на рис. 3). Величину размагничивающего поля можно выразить через намагниченность следующим образом: $H_p = N_p J$, где N_p – баллистический размагничивающий фактор, зависящий от формы и относительных размеров магнита. Определить намагниченность материала магнитов для подшипников, зная размагничивающий фактор, можно, решив приближенными методами уравнение (1) относительно переменной J . Более точное решение можно получить, определив графическим методом рабочую точку магнитов.

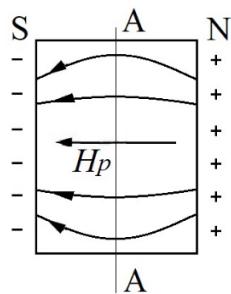


Рис. 3. Схема внутреннего размагничивающего поля магнита

Рабочую точку отдельного постоянного магнита А (A'), которая характеризует остаточную намагниченность материала магнита, получают на пересечении луча, проведенного из начала координат, с кривой размагничивания или линией магнитного возврата. Абсцисса рабочей точки, определенная по графику, соответствует остаточной намагниченности материала магнита.

До тех пор пока рабочая точка остается на участке J_r –Е, намагниченность изменяется незначительно и обратимо. Если рабочая точка переместится вдоль колена кривой размагничивания (точка Р на рис. 2), то произойдет необратимое уменьшение намагниченности магнита J . После этого рабочая точка магнита, например, при наложении внешнего размагничивающего поля будет перемещаться по кривой магнитного возврата Р– J_r . Для всех рассматриваемых магнитотвёрдых материалов линии магнитного возврата достаточно хорошо аппроксимируются прямыми, параллельными касательной к кривой размагничивания в точке с координатами $J = J_r$, $H = 0$. Зная ход кривой магнитного возврата, легко определить намагниченность в любой рабочей точке, лежащей на ней.

Положение рабочей точки магнита, а значит, и намагниченность магнитов изменяется, если на магнит действует внешнее размагничивающее (намагничающее) магнитное поле H_e . В данном случае луч, определяющий положение рабочей точки магнита в отсутствие внешнего магнитного поля, необходимо провести под тем же углом, но из точки с координатами $J = 0, H = H_e$ (см. рис. 2). Как следует из рис. 2, неконтролируемое внешнее магнитное поле может создать опасность снижения намагниченности магнитов до недопустимого уровня, что приведет к потере работоспособности магнитопассивного подшипника.

Необратимое снижение намагниченности материала магнита начинается в полях, превышающих некоторое критическое значение H_k , соответствующее окончанию линейного участка изменения намагниченности в размагничивающих полях (точка Е на рис. 2). Поэтому суммарное размагничивающее поле, действующее на магнит, должно удовлетворять условию $H_e + H_p \leq H_k$. Величина критического магнитного поля более высокая у высококоэрцитивных материалов, и ее приблизительное значение определяется как $H_k \leq 0,95H_{cJ}$ для магнитов из сплава фенибор и $H_k \leq 0,5H_{cJ}$ для Sm-Co магнитов. Многие исследователи, например авторы [13], считают, что в рабочей точке магнитов намагниченность магнитожесткого материала должна превышать $0,9J_r$, однако это означает, что магнит подвергся частичному размагничиванию и его рабочая точка переместилась на некоторую частную кривую магнитного возврата. При этом условии магнитосиловые характеристики подшипников будут примерно на 20 % ниже максимально возможных. Кривую размагничивания в области перегиба для магнитов из фенибора хорошо описывает следующая функция [17]:

$$\frac{J}{J_r} = 1 + 0,052 \frac{H}{H_{cJ}} - 0,95 \exp \left[-119 \left(1 + \frac{H}{H_{cJ}} \right) \right]. \quad (1)$$

Пользуясь выражением (1), легко определить величину размагничивающего поля, соответствующего любому допустимому значению остаточной намагниченности.

Важность проблемы работоспособности магнитопассивных подшипников в условиях воздействия на отдельные магниты размагничивающих полей возрастает при эксплуатации подшипников при повышенных температурах. На рис. 4 приведены кривые размагничивания материала фенибор марки N33 при трех значениях температуры.

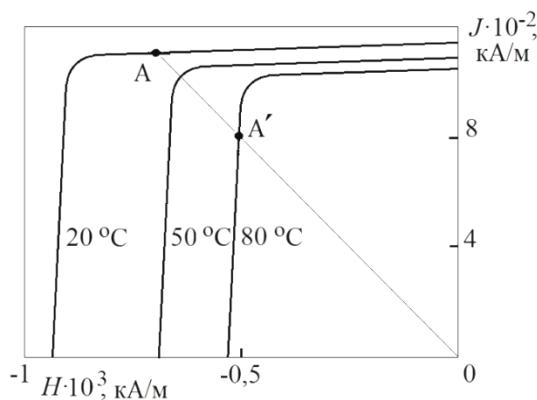


Рис. 4. Рабочая точка магнита фенибор N33 при различных температурах

На этом же графике указаны рабочие точки цилиндрического магнита с размагничивающим фактором $N_p = 0,5$ при относительных размерах $R / H \approx 0,45$. Из

рисунка видно, что при нормальной температуре магнит намагничен до насыщения, но при температуре выше 80 °С он начинает самопроизвольно размагничиваться под влиянием внутреннего поля H_p .

Показанные на рис. 4 температурные изменения намагниченности и коэрцитивной силы происходят в результате необратимого изменения магнитных свойств материалов постоянных магнитов, вызванного изменением магнитной структуры, фазового состава, а также в результате обратимого изменения, обусловленного температурной зависимостью намагниченности и коэрцитивной силы материала магнитов. Свойства постоянных магнитов еще более чувствительны к воздействию повышенных температур, потому что магнитожесткий материал магнитов находится под совокупным действием терромагнитных полей. Например, для Sm–Co-магнитов коэффициент необратимых изменений намагниченности при нагревании возрастает в 1,5 раза по сравнению с изменениями в материале магнитов в размагниченном состоянии. Величина необратимого снижения намагниченности магнитов зависит в основном от величины аксиальной составляющей размагничивающего магнитного поля. Влияние радиальной составляющей поля H_ρ (см. рис. 1) на магниты в основном сводится к небольшим обратимым поворотам вектора намагниченности. Значит, при изучении влияния размагничивающих полей на постоянные магниты следует учитывать не только изменение рабочей точки магнита, но и негативное действие на магнитное состояние материала магнитов.

РАСЧЕТ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО РАЗМАГНИЧИВАЮЩИХ ПОЛЕЙ

Данный расчет можно проводить аналитическим методом, в основе которого лежит вполне обоснованное допущение об однородной и изотропной намагниченности магнитов на основе редкоземельных элементов. Согласно гипотезе Ампера, постоянный магнит можно представить в виде равного ему по размерам соленоида с однослойной и очень тонкой обмоткой, по которой протекают элементарные токи $i_1 = J dz_1$ или i_2 (см. рис. 1) с постоянной плотностью, равной остаточной намагниченности магнита J [18, 19]. Для расчета магнитной напряженности поля внутри и снаружи магнита следует воспользоваться законами Био – Савара – Лапласа.

В магнитной системе, показанной на рис. 1, каждый из магнитов создает внешнее поле, которое является размагничивающим полем H_e для сопряженного магнита. Внешнее размагничивающее поле, например, действующее на магнит 1 со стороны сопряженного магнита 2, имеет две составляющие – аксиальную H_z и радиальную H_ρ , причем $H_z > H_\rho$.

На основании гипотезы Ампера о поверхностных токах в магнитах получено следующее выражение для расчета напряженности внешнего размагничивающего поля H_z в точке с координатами z_1 и ρ , создаваемого нижним магнитом (см. рис. 1):

$$H_z = \int_{-H_2}^0 \frac{J}{2\pi[(R_2+\rho)^2+(z_1-z_2)^2]^{1/2}} \left[E + \frac{R_2^2+\rho^2+(z_1-z_2)^2}{(R_2-\rho)^2+(z_1-z_2)^2} N \right] dz_2, \quad (2)$$

где $E = \int_0^{\pi/2} \frac{d\beta}{\sqrt{1-a^2 \sin^2 \beta}}$ и $N = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-a^2 \sin^2 \beta} d\beta$ ($a^2 = \frac{4R_2\rho}{(z_1-z_2)^2+(R_2+\rho)^2}$) – полные эллиптические интегралы первого и второго рода; μ_0 – магнитная постоянная; J – намагниченность рассматриваемого магнита.

Пользуясь тем же уравнением (1), можно вычислить среднюю напряженность размагничивающего поля в нейтральном сечении магнита ($H_\rho=0$) и после этого легко определить размагничивающий фактор магнита.

Аксиальную силу взаимодействия цилиндрических магнитов, определяющую несущую способность упорного магнитопассивного подшипника, можно рассчитать по формуле

$$F_z = \mu_0 J^2 \int_{-H_2}^0 \int_L^{L+H_1} \frac{(z_1 - z_2)}{[(R_1 + R_2)^2 + (z_1 - z_2)^2]^{1/2}} \times \left[-E + \frac{R_2^2 + R_2^2 + (z_1 + z_2)^2}{(R_1 - R_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} N \right] dz_1 dz_2, \quad (3)$$

где L – расстояние между магнитами.

Пользуясь формулой (3), авторы определяли оптимальные размеры различных по форме магнитов для магнитопассивных подшипников. Оптимальными считались магниты с такими размерами, сила взаимодействия которых в расчете на единицу объема магнитожесткого материала была максимальной. По существу, смысл критерия оптимальности магнитов сводится к минимизации затрат при изготовлении подшипников на дорогостоящие магнитожесткие материалы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во многих современных устройствах используются постоянные магниты для создания усилий между соответствующими конструктивными элементами. Стабильность силовых свойств таких механических устройств зависит от конструкции магнитной системы, условий ее эксплуатации и свойств магнитожестких материалов.

При проектировании магнитосиловых устройств, как правило, основное внимание уделяют учету температурных полей и механических напряжений в постоянных магнитах. Однако причиной недопустимых изменений характеристик магнитов во многих случаях является влияние на их свойства внешних и внутренних размагничивающих магнитных полей. Когда размагничивающее поле превышает некоторое критическое значение, происходит необратимое размагничивание магнитов и снижение силы взаимодействия между ними. Причем, рассматривая последствия уменьшения остаточной намагниченности, необходимо учитывать, что между магнитной силой и намагниченностью существует квадратичная зависимость. Нагревание магнитов усугубляет негативную роль размагничивающих полей.

Решалась задача описания величины и топографии размагничивающих полей для отталкивающихся постоянных магнитов, выполненных из редкоземельных химических элементов. Ее актуальность объясняется отсутствием четких рекомендаций по выбору материалов для магнитопассивных подшипников и других силовых устройств с постоянными магнитами, в которых учтены возможные необратимые изменения намагниченности.

В качестве примера рассмотрена элементарная магнитная система магнитопассивного подшипника, состоящая из двух соосно расположенных магнитов различной формы. Предполагалось, что магниты изготовлены из современных высококоэрцитивных материалов с близкой к прямоугольной петле размагничивания по намагниченности. Для описания напряженности магнитного поля внутри и снаружи магнита использовались аналитические расчеты поля постоянного магнита, основанные на методе эквивалентного соленоида.

ЛИТЕРАТУРА

1. McGilton B., Crozier R., McDonald A., Mueller M. Review of magnetic gear technologies and their applications in marine energy // *IET Renewable Power Generation*. 2018. V. 12. № 2. P. 174–181.

2. McCallum R.W., Lewis L.H., Skomski R., Kramer M.J., Anderson I.E. Practical aspects of modern and future permanent magnets // *Annual Review of Materials Research*. 2014. V. 44. № 1. P. 451–477.
3. Bolotov A.N., Novikov V.V., Pavlov V.G. Magneto-liquid sliding bearings // *Journal of Friction and Wear*. 2004. V. 25. № 3. P. 286–291.
4. Coey J.M.D. Perspective and prospects for rare earth permanent magnets // *Engineering*. 2020. V. 6. № 2. P. 119–131.
5. Fastenau R.H.J., Van Loenen E.J. Applications of rare earth permanent magnets // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1996. V. 157. P. 1–6.
6. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Линейная магнитная муфта возвратно-поступательного перемещения // *Вестник машиностроения*. 2022. № 7. С. 10–16.
7. Falkowski K., Henzel M. High Efficiency Radial Passive Magnetic Beating // *Solid state phenomena*. 2010. V. 164. P. 360–365.
8. Болотов А.Н., Новикова О.О. Контроль намагниченности промышленных постоянных магнитов для магнитосиловых механических систем // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 3 (19). С. 40–46.
9. Yonnet J.P. Passive magnetic bearings with permanent magnets // *IEEE Transactions on Magnetics*. 1978. № 2. P. 803–805.
10. Тишин А.М. Перспективы применения редкоземельных постоянных магнитов в электроприводах специального назначения. К 100-летию использования постоянных магнитов в технике // *Инноватика и экспертиза: научные труды*. 2017. № 1(19). С. 175–192.
11. Zhu Z.Q., Howe D. Halbach permanent magnet machines and applications: a review // *IEE Proceedings-Electric Power Applications*. 2001. V. 148. № 4. P. 299–308.
12. Альтман А.Б., Верниковский Э.Е., Герберг А.Н. [и др.]. Постоянные магниты: справочник / под ред. Ю.М. Пятна. М.: Энергия, 1980. 486 с.
13. Канцырев А.В., Скачков В.С., Панюшкин В.А. [и др.]. Квадрупольные линзы на постоянных магнитах для прототипа протонного микроскопа PRIOR // *Приборы и техника эксперимента*. 2016. № 5. С. 92–103.

Для цитирования: Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Оценка структуры и величины размагничивающих полей в магнитопассивных подшипниках // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 12–21.

EVALUATION OF THE STRUCTURE AND MAGNITUDE OF DEMAGNETIZING FIELDS IN MAGNETIC BEARINGS

A.N. BOLOTOV, Dr Sc., O.O. NOVIKOVA, Cand. Sc., V.V. NOVIKOV, Cand. Sc.

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

The analysis of the magnitude and topography of demagnetizing fields for repulsive permanent rare earth magnets has been carried out and a general analytical approach to describing the force properties of magnets of magnetic bearings has been developed. The reasons leading to a decrease in magnetic properties in passive magnetic bearings have been studied. It has been established that the main causes are temperature field, mechanical stress,

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (28), 2025*

external and internal demagnetizing magnetic fields. The calculation of the external and internal demagnetizing fields for an elementary magnetic system of a magnetic mass bearing consisting of two coaxially arranged magnets of various shapes is carried out. Applying the results of the work, it is possible to determine the optimal size of madness of various shapes for magnetic bearings.

Keywords: magnetoforce devices, magnetopassive bearings, demagnetizing magnetic fields, coercive force, magnetization.

Поступила в редакцию/received: 08.04.2025; после рецензирования/revised: 25.04.2025;
принята/accepted: 30.04.2025

УДК 620.179.118.2

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-21-28

О ПАРАМЕТРАХ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ РЕЗКИ

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

© Измайлова В.В., Новоселова М.В., 2025

Приведены результаты исследования микрорельефа поверхностей образцов из титанового сплава после операции электроэрозионной резки. Определен набор стандартных и нестандартных параметров профиля микрорельефа, а также их соотношений, по которым можно судить о характере профиля шероховатости. Показано, что распределение ординат профиля хорошо описывается нормальным распределением, а также бета-распределением. Это дает основания представить профиль исследованной поверхности в виде широкополосного нормального случайного процесса и использовать возможности данной модели для статистической оценки дополнительных параметров шероховатости. Показано также, что параметры шероховатости поверхностей после электроэрозионной резки сопоставимы с аналогичными параметрами поверхностей после газолазерной резки и механической обработки (шлифования), и это свидетельствует об их общей стохастической природе.

Ключевые слова: титановый сплав, электроэрозионная резка, шероховатость, статистические параметры, профильный метод.

ВВЕДЕНИЕ

Микрорельеф технической поверхности (волнистость, шероховатость, субшероховатость) является одной из основных характеристик ее качества и определяет многие ее свойства – от чисто декоративных до принципиально важных эксплуатационных. Параметры микрорельефа, определяющие эксплуатационные свойства поверхности, зависят как от режимов технологической обработки поверхности, так и от свойств обрабатываемого материала. Связь технологических режимов обработки технических поверхностей и параметров их качества была и остается предметом многочисленных исследований. Наиболее изучены поверхности после различных видов механической обработки, однако с появлением новых технологических методов обработки и новых методов исследования качества

получаемой поверхности возникает необходимость в продолжении работы в этом направлении.

Одним из таких менее исследованных в плане качества получаемой поверхности технологических методов является электроэрозионная обработка и, в частности, такая ее разновидность, как электроэрозионная резка. Механизм образования микрорельефа поверхности в процессе электроэрозионной обработки принципиально отличается от аналогичного механизма в процессе механической обработки. Во втором случае микрорельеф формируется в основном в результате механического воздействия инструмента на материал обрабатываемой поверхности, тогда как в первом – главным образом в результате термического воздействия электрических разрядов. В связи с этим возникает вопрос о применимости параметров шероховатости, характеризующих качество поверхности после механической обработки, к поверхности после электроэрозионной обработки, в частности, после электроэрозионной резки [1].

Процессы обработки технических поверхностей объединяет то обстоятельство, что на них влияют несколько факторов, носящих в основном случайный характер, что определяет также случайный характер формируемого микрорельефа поверхности. В связи с этим при исследовании шероховатости технических поверхностей возможно применение модели шероховатости как случайного поля, а профиля шероховатости – как случайного процесса [2, 3]. Такой вероятностно-статистический подход универсален и применим к шероховатости любого происхождения.

Цель данной работы – исследование характера шероховатости металлической поверхности после электроэрозионной резки с определением стандартных и нестандартных параметров и сравнение их с аналогичными параметрами шероховатости поверхностей после других видов обработки.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования являлась поверхность образца титанового сплава ВТ6 после операции электроэрозионной резки на прошивочно-вырезном электроэрозионном станке DK7750 при токе 5 А.

Параметры шероховатости определялись профильным методом с помощью профилометра контактного модели 130. Несмотря на имеющиеся современные технические возможности пространственной оценки структуры поверхностей, профильный метод по-прежнему широко применяется для исследования качества технических поверхностей [4].

На основании ГОСТ Р ИСО 4287-2014 «Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности», который содержит наиболее полный набор параметров, определялись следующие параметры микрорельефа:

R_a – среднее арифметическое отклонение оцениваемого профиля;

R_p – максимальная высота пика профиля;

R_v – наибольшая глубина впадины профиля;

R_z – максимальная высота профиля ($R_z = R_p + R_v$);

R_c – средняя высота элементов профиля;

R_{Sm} – средняя ширина элементов профиля.

Параметр R_a характеризует среднюю амплитуду профиля шероховатости, определяется усреднением по большому объему выборки и поэтому статистически весьма устойчив: единичные нетипичные пики или впадины несущественно влияют на его значение. В то же время данный параметр практически не несет информации о

форме элементов профиля и может принимать одинаковые значения для совершенно разных по характеру профилей.

Параметры Rp , Rv и Rz являются экстремальными, т. е. определяются единственным значением в пределах базовой длины, поэтому статистически нестабильны.

Параметр RSm статистически более устойчив, так как определяется средним значением в пределах базовой длины.

Помимо дискретных (точечных) параметров качества поверхности определяли весьма информативную интегральную характеристику – так называемую кривую коэффициента смятия профиля, более известную в трибологии и других приложениях как опорная кривая или кривая Эбботта – Файрстоуна. Кривую коэффициента смятия профиля (опорную кривую) согласно ГОСТ Р ИСО 4287-2014 можно интерпретировать как интегральную функцию распределения случайной величины – ординаты профиля $Z(x)$ – в пределах длины оценки.

В дополнение к стандартным параметрам определяли также набор нестандартных величин:

v – показатель степени степенной аппроксимации начального участка опорной кривой;

$Rmr(m)$ – коэффициент смятия профиля на уровне средней линии tm , равный отношению опорной длины материала элементов профиля на уровне средней линии к длине оценки. В литературе по качеству технических поверхностей для этого параметра также используется обозначение t_m ;

n_0 – число нулей профиля (число пересечений профиля средней линией) в расчете на единицу длины;

m – число локальных максимумов профиля в расчете на единицу длины;

r_m – средний радиус кривизны вершин выступов (пиков) профиля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Стандартные параметры шероховатости исследуемой поверхности представлены в табл. 1. Их значения приведены с величинами стандартных отклонений, которые не превышают 15 %, что свидетельствует об однородности шероховатости.

Таблица 1. Параметры шероховатости поверхности после электроэррозионной резки

Ra , мкм	Rp , мкм	Rv , мкм	Rz , мкм	Rc , мкм	RSm , мм
$2,0 \pm 0,1$	$9,8 \pm 0,8$	$9,6 \pm 1,4$	$19,4 \pm 1,8$	$7,8 \pm 0,2$	$0,13 \pm 0,03$

Типичные кривые коэффициента смятия профиля (опорные кривые) приведены на рис. 1 в относительных координатах $(1 - \epsilon) = f(tp)$, где $\epsilon = p / Rz$; $tp = \frac{\sum_1^n b_i}{ln}$; p – уровень сечения профиля, отсчитанный от уровня вершины максимального выступа; $\sum_1^n b_i$ – сумма длин отрезков, отсекаемых на уровне p линией, эквидистантной средней линии; ln – длина оценки.

На рис. 2 обобщенная опорная кривая представлена в ином виде – как интегральная функция распределения $F(z)$ относительной случайной величины $z = Z / Rz$, где Z – абсолютная ордината профиля, а на рис. 3 приведена соответствующая функция плотности вероятности $f(z)$ в виде полигона распределения вероятностей.

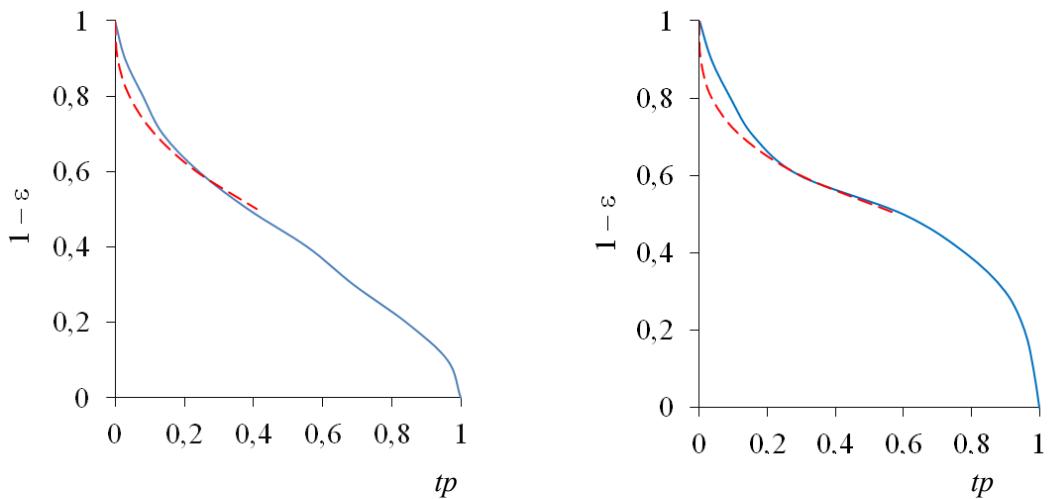


Рис. 1. Примеры опорных кривых профиля шероховатости поверхности реза в двух взаимно перпендикулярных направлениях: пунктирная линия – экспериментальная кривая; сплошная – степенная аппроксимация начального участка

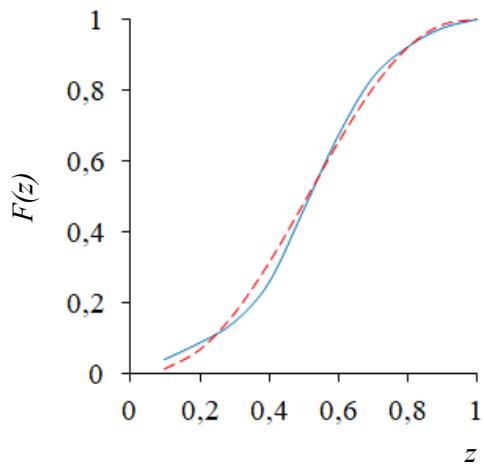


Рис. 2. Интегральная функция распределения ординат профиля: сплошная линия – экспериментальная кривая; пунктирная – бета-распределение

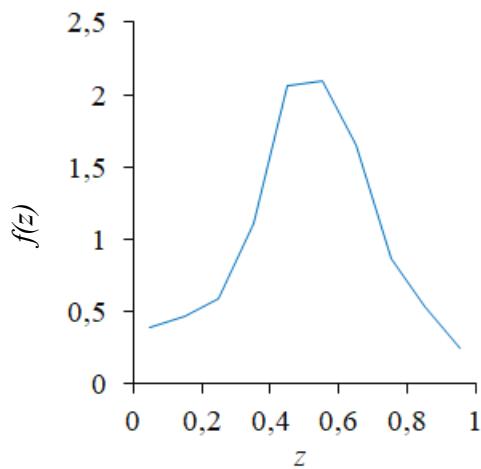


Рис. 3. Полигон распределения вероятностей ординат профиля

На рис. 4 представлено сопоставление интегральной функции распределения ординат профиля шероховатости исследованной поверхности с нормальной функцией распределения. Наблюдаются лишь незначительные отклонения распределения ординат профиля исследуемой поверхности от нормального распределения, проверка по критерию Лиллифорса [5, 6] показала, что гипотеза о нормальном распределении ординат профиля не противоречит экспериментальным данным.

Отметим, что распределение ординат профиля поверхности реза также хорошо аппроксимируется бета-распределением (см. рис. 2):

$$f(z) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} z^{\alpha-1} (1-z)^{\beta-1},$$

где $B(\alpha, \beta)$ – бета-функция; $\alpha = 2,68$; $\beta = 2,57$.

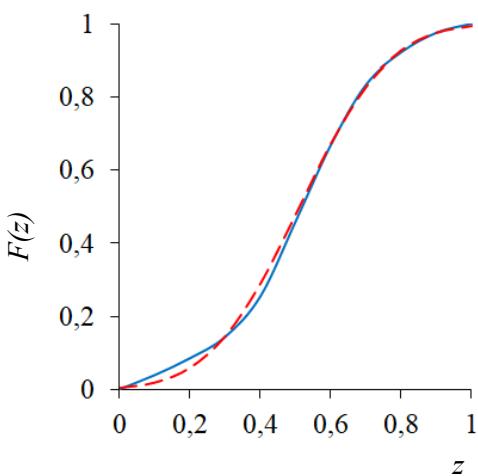


Рис. 4. Интегральная функция распределения ординат профиля поверхности реза (сплошная линия) в сравнении с нормальной функцией распределения (пунктирная)

Нестандартные параметры шероховатости исследуемой поверхности приведены в табл. 2.

Таблица 2. Нестандартные параметры шероховатости поверхности после электроэррозионной резки

v	$Rmr(m) \equiv tm$	$n_0, \text{ММ}^{-1}$	$m, \text{ММ}^{-1}$	$r_m, \text{МКМ}$
$3,2 \pm 0,5$	$0,44 \pm 0,05$	$15,0 \pm 1,4$	$15,5 \pm 2,4$	110 ± 12

Параметр степенной аппроксимации начального участка опорной кривой v рассчитывали по формуле [7]:

$$v = 2tm \left(\frac{R_p}{R_a} - 1 \right).$$

Рассчитанное таким образом по параметрам шероховатости R_p , R_a и tm значение $v = 3,2$ практически совпадает со значением $v = 3,1$, соответствующим параметрам бета-распределения $\alpha = 2,68$; $\beta = 2,57$ [8].

Параметры n_0 и m определены непосредственно по профилограммам исследуемой поверхности, средний радиус кривизны вершин пиков профиля r_m рассчитан по формуле [9]:

$$r_m = (2\pi^2 \bar{R}_a \bar{n}_0 \bar{m})^{-1}, \quad (1)$$

где \bar{R}_a , \bar{n}_0 , \bar{m} – математические ожидания соответствующих величин.

Формула (1) получена на основании модели профиля шероховатой поверхности как нормального стационарного случайного процесса [9]. Данная модель успешно применяется для анализа микрорельефа технических поверхностей [2, 3] и позволяет сделать некоторые выводы о характере профиля исследуемой поверхности, которые приведены ниже.

Параметр $\lambda = \frac{\bar{n}_0}{\bar{m}}$ теоретически изменяется в пределах $0 \leq \lambda \leq 2$ и имеет важное значение в теории случайных процессов, так как характеризует ширину спектра процесса (в данном случае профиля): малые значения λ соответствуют широкополосному спектру, значения λ , близкие к верхней границе, – узкополосному, в пределе монохроматическому спектру (один пик между двумя нулями). Для исследованной поверхности $\lambda = 1,01 \pm 0,18$, откуда можно заключить, что профиль имеет как случайную, так и регулярную составляющую.

Параметр n_0 позволяет оценить статистически нестабильную величину R_p – максимальную высоту пика профиля – по намного более стабильной величине R_a [9]:

$$\bar{R}_p \approx \bar{R}_a \sqrt{\pi \ln \left(\frac{l_n \bar{n}_0}{2} \right)}, \quad (2)$$

где l_n – длина оценивания. Такая оценка позволяет отсеять отдельные нетипичные выступы, не влияющие на эксплуатационные свойства поверхности. Согласно формуле (2) для исследуемой поверхности отношение $\frac{\bar{R}_p}{\bar{R}_a} \approx 3 - 3,8$, что меньше соответствующего значения по данным табл. 1.

Для полноты анализа сравним параметры шероховатости исследованной поверхности после электроэрозионной резки с типичными параметрами шероховатости после механической обработки [9] и лазерной резки [10] (табл. 3). Для сравнения выбраны поверхности, имеющие близкие значения параметра R_a . В основном сопоставлены не абсолютные значения параметров, а их соотношения, что более информативно, так как первые зависят в основном от режимов обработки, тогда как вторые – от характера шероховатости.

Таблица 3. Параметры шероховатости и их соотношения

Обработка	R_a , мкм	R_p / R_a	RSm / R_a	$Rmr(m) \equiv tm$	v	λ	r_m , мкм
Электроэрозионная резка	2,0	4,9	70	0,44	3,2	1,01	110
Лазерная резка	2,5	4,8	125	0,40	2,8	1,0–1,4	140
Механическое шлифование	2,51	4,5	53	0,50	3,4	0,94	83

Практически все относительные значения для трех различных по физическому принципу технологических процессов обработки поверхностей близки, за исключением отношения шагового параметра RSm к высотному параметру Ra . По-видимому, это следствие того, что параметр RSm связан с продольным (вдоль поверхности) движением инструмента и более детерминирован, чем параметр Ra . Сходство параметров λ для сравниваемых поверхностей свидетельствует о близком спектральном составе профиля, а сходство параметров опорной кривой – о сходном характере распределения ординат профиля, что позволяет считать правомерным применение модели нормального случайного процесса к профилю всех сравниваемых поверхностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определенные в ходе исследований рельефа поверхности титанового сплава ВТ6 после электроэрозионной резки стандартные и нестандартные параметры профиля шероховатости, а также соотношения некоторых параметров свидетельствуют о том, что к данному профилю применима модель случайного широкополосного нормального процесса. Этот вывод подтверждается сравнением соответствующих параметров профиля с параметрами поверхности после механической обработки (шлифования), для которой данная модель успешно применялась многими исследователями. Достоинство этой вероятностно-статистической модели в ее универсальности и независимости от происхождения конкретной технической поверхности.

В работе не ставилась задача исследовать связь конкретных параметров профиля шероховатости с режимами электроэрозионной обработки, что целесообразно выбрать в качестве направления дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серебренецкий П.П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование: учебное пособие. СПб.: Лань, 2022. 352 с.
2. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. 472 с.
3. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход). М.: Наука, 1975. 344 с.
4. Иванов И.А., Губенко С.И., Кононов Д.П. Поверхность деталей машин и механизмов: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2021. 156 с.
5. Lilliefors H.W. On the Kolmogorov – Smirnov test for normality with mean and variance unknown // *Journal of the American Statistical Association*. 1967. V. 62. № 318. P. 399–402.
6. Gibbons J.D., Chakraborti S. Nonparametric Statistical Inference. New York: Marcel Dekker, 2003. 646 p.
7. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Основы механики и физики контактного взаимодействия, трения и изнашивания технических поверхностей: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2025. 172 с.
8. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Опорная кривая и бета-распределение высот и радиусов вершин выступов шероховатой поверхности // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2018. Вып. 11. С. 4–10.

9. Рудзит Я.А. Микрография и контактное взаимодействие поверхностей. Рига: Зинатне, 1975. 210 с.

10. 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.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. О параметрах микрорельефа поверхности металла после электроэрозионной резки // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 21–28.

ON THE PARAMETERS OF THE MICRORELIEF OF THE METAL SURFACE AFTER ELECTRIC DISCHARGE WIRE CUTTING

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 article presents the results of the study of the microrelief of the surfaces of titanium alloy samples after electrical discharge wire cutting. A set of standard and non-standard parameters of the microrelief profile, as well as their ratios, is determined, by which one can judge the nature of the roughness profile. It is shown that the distribution of the profile ordinates is well described by the normal distribution, as well as by the beta distribution. This gives grounds to represent the profile of the studied surface as a broadband normal random process and to use the capabilities of this model for the statistical assessment of additional roughness parameters. It is also shown that the roughness parameters of the surfaces after electrical discharge cutting are comparable with similar parameters of the surfaces after gas-laser cutting and mechanical processing (grinding), which indicates their common stochastic nature.

Keywords: titanium alloy, electrical discharge wire cutting, roughness, statistical parameters, profile method.

Поступила в редакцию/received: 20.06.2025; после рецензирования/revised: 30.06.2025;
принята/accepted: 02.07.2025

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

УДК 622:504.55: 502.57

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-29-37

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНСЕРВАЦИИ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ БУРОГО УГЛЯ С ЦЕЛЬЮ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ И СОХРАНЕНИЯ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА НЕДР

Л.В. ЛОБАЧЕВА, канд. техн. наук

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

© Лобачева Л.В., 2025

Рассмотрены основные подходы к разработке технологий консервации техногенных месторождений добычи бурого угля. Обоснованы технологические принципы консервации техногенных месторождений. Представлены результаты исследования техногенного сырья на содержание тяжелых металлов и уровень кислотности. Данна оценка геохимических изменений, повреждений земной поверхности в зоне влияния массива отходов. Предложена технология консервации породного отвала для комплексного освоения и сохранения ресурсного потенциала недр.

Ключевые слова: бурый уголь, углепородное сырье, породный отвал, техногенное месторождение, консервация, комплексное освоение месторождений, ресурсный потенциал, сорбенты.

ВВЕДЕНИЕ

В горнопромышленном комплексе, несмотря на разработку и внедрение современных технологий и способов добычи, на сегодняшний день ключевой остается проблема размещения техногенный образований (техногенных месторождений), основная масса которых сформирована в последние несколько десятилетий [1, 3]. К техногенным образованиям относятся массивы отходов добычи и переработки минерального сырья, основным методом обращения с которыми до сих пор является наземное складирование, исключающее на длительное время занятые ими территории из хозяйственного оборота и создающее угрозу для экологической безопасности в границах их влияния [3-5].

Положение усугубляется тем, что с 1994 года 203 шахты были ликвидированы в рамках реструктуризации угольной промышленности из-за их опасности и нерентабельности. В большинстве ликвидированных горных выработок не были выполнены комплексные технические мероприятия по консервации и рекультивации, что стало причиной трансформации техногенно-минерального сырья, снижения его ресурсного потенциала, а также большинства аварий, связанных с повреждением земной поверхности [4, 6].

Складируемые в породных отвалах ликвидированных шахт отходы зачастую экономически доступны для использования как вторичные материалы во многих отраслях промышленности, что способствует развитию эффективного ресурсо-сбережения. Кроме того, техногенные месторождения закрытых горных выработок, как

правило, находятся на территориях с развитой транспортной и инженерной инфраструктурой, где имеются потенциальные заказчики вторичных материалов, что может в какой-то степени обеспечить сырьевое импортозамещение и технологическую независимость отечественных предприятий [2].

В настоящее время для уменьшения негативного воздействия техногенных образований на окружающую среду проводится три группы мероприятий:

рекультивация, направленная на снижение уровня деградации земель и восстановление их хозяйственной ценности в соответствии с целевым назначением. Затраты на рекультивацию зависят от применяемой технологии, вида нарушений, типа нарушенных земель [7];

ликвидация, предполагающая переработку и извлечение ценных компонентов отвальной породы, используемых в различных отраслях промышленности. Необходимым условием проведением работ по данному направлению, является наличие свободного пространства (например, выработанного карьера) для размещения техногенного сырья. Кроме того, ликвидация является наиболее дорогостоящим, но и эффективным способом снижения накопленного вреда окружающей среде [7];

консервация, являющаяся оптимальным способом охраны нарушенных земель и предусматривающая решение двух задач: природоохранной, направленной на сокращение негативного воздействия техногенных массивов за счет их изоляции от агрессивных факторов окружающей природной среды и позволяющей сохранить их ресурсный потенциал, и промышленной, предполагающей при развитии современных технологий переработки и извлечении полезных компонентов применение комплекса мероприятий по ликвидации техногенных образований [7].

Актуальность выполнения работ по обоснованию и внедрению технологий консервации техногенных образований связана с необходимостью модернизации минерально-сырьевого комплекса РФ и соответствует стратегическим целям и задачам развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 года требующей разработки и внедрения современных геотехнологий, направленных на создание условий для комплексного освоения техногенных месторождений [8, 9].

В связи с вышеперечисленным целью работы является обоснование технологии консервации техногенных месторождений добычи бурого угля, способствующей комплексному освоению и сохранение ресурсного потенциала недр.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разработка современных технологий консервации техногенных образований основана на комплексе геологических, гидрогеологических, геотехнологических исследований, позволяющих произвести последовательный ряд технических решений, обеспечивающих сохранность ресурсного потенциала, экологической стабильности и безопасности техногенных месторождений.

Объектом исследования является породный отвал бурого угля Нелидовского месторождения Подмосковного угольного бассейна, расположенного в южной части его западного сектора на территории Тверской области. Характерная особенность района добычи состоит в широком развитии ледниковых отложений и древних речных долин, местами разобщающих угольные залежи, что наряду с наличием многочисленных водоносных горизонтов определяет сложные гидрогеологические и горнотехнические условия эксплуатации месторождения [10].

Рельеф земной поверхности исследуемого района расположения техногенного образования волнистый, с небольшими холмистыми участками. Среднегодовое количество осадков составляет 500...700 мм в год, уровень показателя испаряемости

370...420 мм, что наряду со слабым уклоном земной поверхности способствует пополнению запасов подземных вод, а также интенсифицирует процессы выноса углепородной смеси по склону техногенного месторождения с поверхностными атмосферными водами [10, 11].

Разработка месторождения в этом районе проводилась с 1946 года и была прекращена в конце 1990-х годов в связи с нерентабельностью. Комплекс работ по ликвидации шахты «Нелидовская» был произведен в сокращенном формате, т. е. были устраниены только инфраструктурные объекты, а мероприятия по приведению территории горной выработки в безопасное состояние (рекультивация, консервация, ликвидация) не выполнялись.

Исследование включало два этапа, на которых для обоснования возможности и необходимости применения технологии консервации техногенного месторождения оценивались геохимические изменения, повреждения земной поверхности в зоне влияния массива отходов [12].

На первом этапе работ проводилась оценка состояния, уровня трансформации породного отвала Нелидовского месторождения и прилегающей территории. Был сделан отбор и анализ образцов углепородной смеси, проб грунта и воды озер, расположенных вблизи техногенного образования, на содержание тяжелых металлов и уровень кислотности грунта по стандартной методике [13–15].

Для исследования характера изменений поверхности породного отвала проводились натурные наблюдения и использовались данные спутниковых снимков [16].

На втором этапе на основании полученных результатов были предложены технологии и технические решения по консервации техногенного образования Нелидовского месторождений бурого угля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для обоснования технологии консервации породного отвала Нелидовского месторождения анализировались данные мониторинговых исследований техногенного массива и прилегающей территории.

Для оценки геохимических изменений углепородной смеси отвала образцы грунта № 1–4 исследовались на содержание тяжелых металлов (рис. 1).

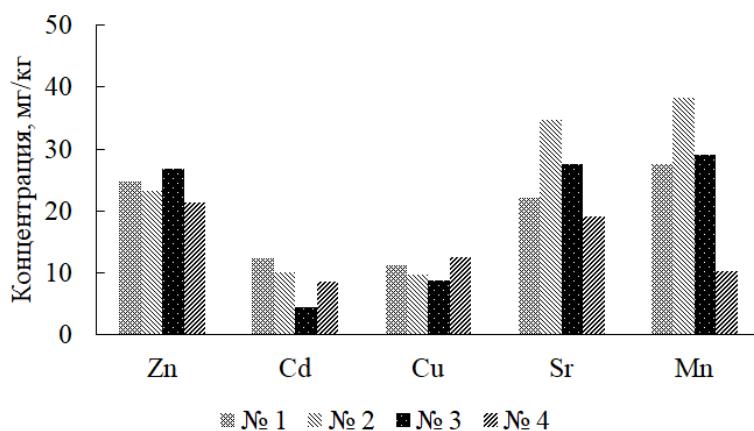


Рис. 1. Содержание тяжелых металлов в углепородной смеси

Химический анализ образцов грунта показал относительно невысокое содержание тяжелых металлов в отвальной породе, в основном ниже нормативных значений,

а уровень показателя pH изменялся в пределах 2,4 до 3,1, что создает условия для выщелачивания и, соответственно, подвижности химических веществ из техногенного месторождения.

Содержащиеся в породном отвале соединения серы вместе с кислоторастворимыми соединениями тяжелых металлов при взаимодействии с атмосферными осадками смываются с поверхности техногенного массива на природный ландшафт, загрязняя почвы и ближайшие водные объекты. Результаты исследования воды из расположенных в зоне влияния отвала озер представлены на рис. 2.

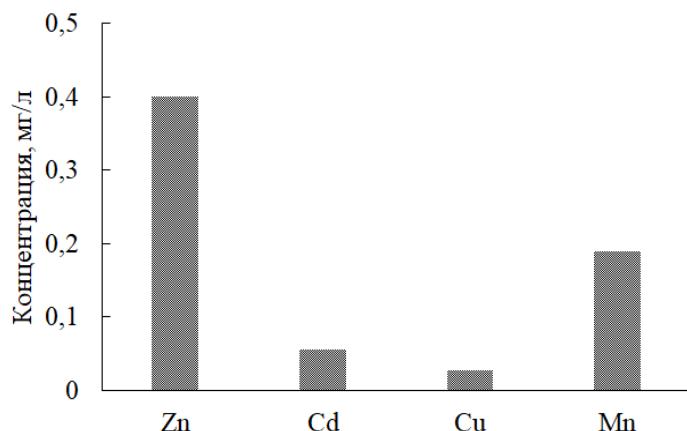


Рис. 2. Содержание тяжелых металлов в озерах, находящихся в зоне влияния Нелидовского породного отвала

Результаты натурных наблюдений показывают, что водорастворимые соединения химических веществ, инфильтруясь через тело техногенного месторождения в водоносные горизонты, способствуют формированию вертикальной миграции фильтрата породной массы в грунт его основания.

Вертикальная миграция вещества в глубь техногенного массива через почвогрунтовую толщу описывается одномерным уравнением конвективной диффузии, которое в случае нисходящего вертикального потока имеет вид [16]:

$$n_e \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial z} - \gamma C; \quad (1)$$

начальные условия уравнения (1):

$$t = 0: C(z, 0) = C_0(z);$$

граничные условия уравнения (1):

$$t > 0 \begin{cases} z = 0: [C(0, t) - C_e]v = D \frac{\partial C(0, t)}{\partial z}, \\ z = L: C(L, t) = C_{e\sigma}, \text{ или } \frac{\partial C(L, t)}{\partial z} = 0, \end{cases}$$

где C_e , $C_{e\sigma}$, C_0 – соответственно концентрация вещества в фильтрате, в грунтовых водах и начальная (фоновая) концентрация; n_e – эффективная пористость грунта;

D – коэффициент конвективной диффузии; v – скорость фильтрации; γ – коэффициент скорости трансформации вещества; t – время; z – сечение пласта; L – протяженность почвогрунтовой толщи.

Согласно результатам вычислительного эксперимента по прогнозу распространения веществ в глубину породной массы, миграция токсикантов с поверхности техногенного массива приводит к загрязнению грунта и подстилающих пород, что создает экологическую опасность для прилегающих к отвалу территорий.

Форма рельефа местности и ориентация склонов техногенного образования Нелидовских шахт позволяет на основании данных космической съемки определить направления поверхностных водных потоков, формирующихся под влиянием атмосферных осадков (рис. 3).

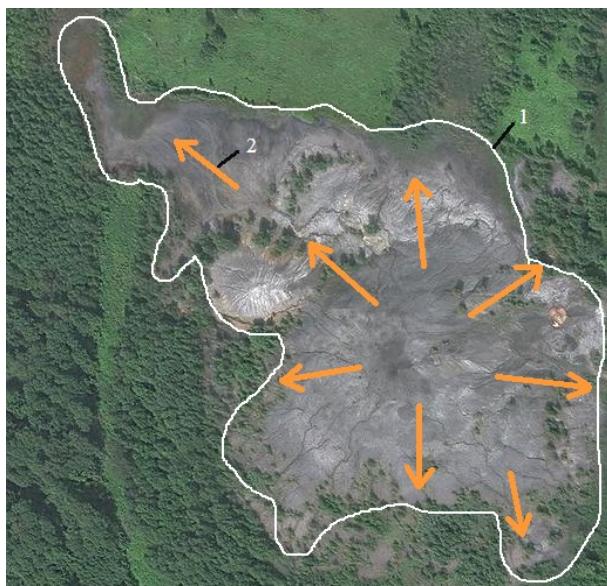


Рис. 3. Фрагмент спутниковой карты породного отвала Нелидовского буроугольного месторождения [17]: 1 – контур породного отвала; 2 – направления движения поверхностных водных потоков вместе с углепородной смесью

Анализ спутниковых карт позволил выявить отсутствие проведения комплекса горно-планировочных и горно-рекультивационных работ по формированию архитектуры породного отвала и снижению его негативного воздействия на прилегающие территории. В результате под влиянием природных и антропогенных факторов происходит перемещение углепородной смеси на ландшафт, что сокращает площадь наземной растительной экосистемы.

Исследование спутниковых снимков и натурные наблюдения позволили выявить деформацию поверхности отвала, возникшую в результате воздействия ветровой и водной эрозии, способствующих выдуванию, размыву, смыву пород и формированию просадок, осыпей, трещин (рис. 4). Рассмотренные процессы приводят к физическим потерям техногенного сырья и снижению потребительских свойств его компонентов.

Для сохранения ресурсного потенциала породного отвала Нелидовского месторождения, предотвращения его контакта с агрессивными факторами окружающей среды и снижения негативного воздействия техногенного образования на прилегающие территории предлагается применить технологию консервации.



Рис. 4. Поверхность склона породного отвала Нелидовского месторождения [18]

На основе разработанных отечественными специалистами технических решений [2, 7, 19] по консервации техногенных месторождений предложено провести работы в несколько этапов. На начальном этапе необходимо выполнить планировочные работы, включающие выравнивание поверхности и откосов породного отвала, устранение сорной растительности, уборку мусора.

Для разуплотнения «лежальных» породных отходов рекомендуется проводить рыхление верхней толщи грунта поверхности техногенного образования на глубину до 1 м.

На втором этапе формируется система изоляции техногенного месторождения от воздействия агрессивных природных факторов (рис. 5).

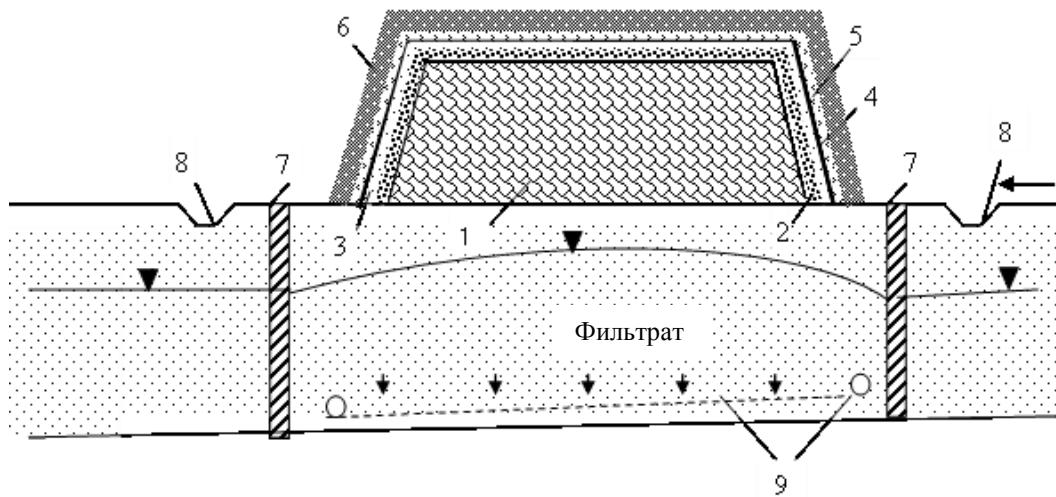


Рис. 5. Конструкция консервации породного отвала:

- 1 – тело породного отвала;
- 2 – слой мелиоративного торфяного сорбента;
- 3 – газодренажный слой;
- 4 – гидроизоляционный слой;
- 5 – водно-дренажный слой;
- 6 – защитный слой грунта;
- 7 – противофильтрационная завеса;
- 8 – контурный водоотводный канал;
- 9 – дренажные трубы

После рыхления предлагается нанести на углепородную смесь слой мелиоративного сорбента на основе торфа, который позволит задержать в породной толще водорастворимые соединения тяжелых металлов и уменьшить их вынос из отвала [19, 20]. Поверх сорбционного слоя формируется газовый дренаж из щебня или гальки для пассивного отвода газов из тела техногенного массива. Следующим укладывается гидроизоляционный слой, выполненный из геотекстильных материалов, для защиты газодренажного слоя от механических повреждений. Для отвода атмосферных осадков сверху наносится дренажный слой [2]. На вершине техногенного массива укладывается защитный слой грунта или торфа.

На заключительном этапе проводится комплекс мероприятий по защите грунтовых вод от негативного воздействия фильтрата, сформированного в теле породного отвала. Для аккумулирования вертикальных водных потоков в районе расположения породного отвала предлагается применить противофильтрационное устройство в виде кольцевой завесы. В результате поток загрязненных грунтовых вод будет собираться внутри контура завесы и перехватываться с помощью труб кольцевого дренажа при прохождении через водоносный слой. Противофильтрационная завеса представляет собой траншею, в которой размещают материал с низкими фильтрационными свойствами (например, глины). Поверхностный сток собирают с помощью кольцевого сборного канала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные на техногенном месторождении исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Проведена оценка состояния Нелидовского техногенного месторождения для обоснования применения технологии консервации породного отвала в целях его комплексного освоения.

2. Анализ породной массы на содержание тяжелых металлов и уровень pH позволил выявить процессы выщелачивания исследуемых химических веществ вместе с атмосферными водами и их смыв с поверхности техногенного массива на природный ландшафт, что приводит к загрязнению почв и ближайших водных объектов.

3. Водорастворимые соединения химических веществ, инфильтруясь через тело техногенного месторождения в водоносные горизонты, способствуют формированию вертикальной миграции фильтрата породной массы в грунт его основания.

4. Путем анализа спутниковых снимков и натурных наблюдений выявлена деформация поверхности отвала, которая явилась результатом воздействия ветровой, водной эрозии, способствующих выдуванию, размыву, смыву пород и формированию просадок, осипей, трещин.

5. Для сохранения ресурсного потенциала породного отвала Нелидовского месторождения, предотвращения его контакта с агрессивными факторами окружающей среды и снижения его негативного воздействия на прилегающие территории предложено применить технологию консервации техногенного образования, которая включает планировочные работы, мероприятия по формированию системы изоляции породного отвала и комплекс технических решений по защите природного ландшафта от негативного влияния вертикальной миграции токсичных соединений породной массы.

Таким образом, применение технологии консервации породного отвала обеспечит эффективную изоляцию техногенного сырья от влияния негативных природных явлений, способствующих протеканию химических и физико-механических реакций, и исключит дальнейшие потери ценных компонентов складируемой породы,

тем самым способствуя сохранению их ресурсного потенциала и экологической безопасности прилегающих природных ландшафтов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А.Б., Хасанова Г.Г., Талалай А.Г. Техногенные месторождения: особенности исследования // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2019. Вып. 3 (55). С. 58–62.
2. Вайсман Я.И., Гайдай М.Ф. Разработка технологии консервации терриконников и сохранения ресурсного потенциала в целях снижения их негативного воздействия на окружающую среду // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. 2016. Т. 15. № 19. С. 175–184.
3. Илимбетов А.Ф., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Разработка технологии формирования и комплексного освоения техногенных месторождений на основе отходов переработки руд // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008. № 4. С. 247–256.
4. Крупская Л.Т., Зверева В.П., Склярова Г.Ф., Орлов А.М. Техногенные поверхностные образования как источник загрязнения экосферы и обоснование возможности их освоения в Дальневосточном федеральном округе // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021. № 2. С. 5–21.
5. Пашкевич М.А., Паршина М.В. Разработка искусственного геохимического барьера в зоне воздействия техногенных массивов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № 6. С. 275–283.
6. Тюленева Т.А. Совершенствование технологии ликвидации провалов над горными выработками // *Техника и технология горного дела*. 2021. № 1 (12). С. 4–26.
7. Басова И.А., Прохоров Д.О., Пьянков С.В. Предложения по охране земель от негативного воздействия техногенных минеральных образований // *Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий*. 2021. № 5. С. 135–144.
8. Каплунов Д.Р., Качурин Н.М., Фридлендер Г.В., Ганин М.П. Комплексное освоение угольных и техногенных месторождений Подмосковного угольного бассейна // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2019. № 4. С. 113–123.
9. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Викторов С.Д., Рыльникова М.В., Радченко Д.Н. Научное обоснование технологий комплексного ресурсоохраняющего освоения месторождений стратегического минерального сырья // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2014. № 12. С. 5–12.
10. Геологическое описание Нелидово-Селижаровского угленосного района. URL: <https://industrial-wood.ru/geologiya-mestorozhdeniy-uglyam/15669-geologicheskoe-opisanie-nelidovo-selizharovskogo-uglenosnogo-rayona.html> (дата обращения: 10.04.2025).
11. Кирюшина Е.В., Зеньков И.В., Конде А.С., Юронен Ю.П., Вокин В.Н., Миронова Ж.В., Сизова Т.Н. Исследование экологических последствий после закрытия угольных шахт в Смоленской и Калужской областях по данным спутниковой съемки // *Уголь*. 2025. № 2. С. 125–129.
12. Лобачева Л.В. Обоснование технологии комплексного освоения техногенных месторождений бурого угля // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 1 (25). С. 39–47.

13. ГОСТ Р 59248-2020. Угли бурые, каменные, антрацит, горячие сланцы и угольные брикеты. Методы отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний. М.: Стандартинформ, 2021. 12 с.
14. ГОСТ Р 55660-2013. Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ. М.: Стандартинформ, 2019. 14 с.
15. ПНД Ф 12.1:2:2.2:2.3.2-03. Отбор проб почв, грунтов, осадков биологически очистных сооружений, шламов промышленных сточных вод, донных отложений искусственно созданных водоемов, прудов-накопителей и гидротехнических сооружений. М.: ФБУ «ФЦАО», 2014. 14 с.
16. Косов В.И., Шульгин Д.Ф., Клыков В.Е., Иванов В.Н. Математическое моделирование природных экосистем: учебное пособие / под ред. В.И. Косова. Тверь: ТГТУ, 1998. 255 с.
17. Тверская область. Террикон пос. Нелидово. URL: https://yandex.ru/maps/10816/nelidovo/geo/posyolok_shakhty_11/1499082772/?l=sat&ll=32.789385%2C56.248200&source=serp_navig&z=17 (дата обращения: 23.04.2025).
18. Тверская область. Шахты пос. Нелидово. URL: <https://yandex.ru/images/search?from=tabbar&lr=14&p=1&text=нелидовские%20шахты> (дата обращения: 24.04.2025).
19. Лебзин М.С. Обоснование технологии консервации породных отвалов сорбент-ориентированным способом: дис. канд. тех. наук. Екатеринбург, 2025. 159 с.
20. Тимофеев А.Е., Мисников О.С. Методы модификации формованных сорбционных материалов на основе торфа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 5. С. 112–120.

Для цитирования: Лобачева Л.В. Обоснование технологии консервации породных отвалов бурого угля с целью комплексного освоения и сохранения ресурсного потенциала недр // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 29–37.

JUSTIFICATION OF TECHNOLOGY OF CONSERVATION OF BROWN COAL WASTE DUMPS FOR PURPOSE OF COMPREHENSIVE DEVELOPMENT AND PRESERVATION OF RESOURCE POTENTIAL OF SUBSOIL

L.V. LOBACHEVA, Cand. Sc.

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

The main approaches for the development of technologies for the conservation of technogenic brown coal mining deposits are considered, the technological principles of conservation of technogenic deposits are substantiated. The results of a study of technogenic raw materials for the content of heavy metals and the level of acidity are presented. An assessment of geochemical changes and damage to the Earth's surface in the zone of influence of the waste array is given. A technology of rock dump conservation is proposed for the integrated development and conservation of the resource potential of the subsurface.

Keywords: brown coal, hydrocarbon raw materials, rock dump, man-made deposit, conservation, integrated development of deposits, resource potential, sorbents.

Поступила в редакцию/received: 15.05.2025; после рецензирования/revised: 02.06.2025;
принята/accepted: 17.06.2025

**ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ
ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ
И ДИАГНОСТИКИ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
ПОГРУЗОЧНО-ДОСТАВОЧНЫХ МАШИН**

О.М. БУХТЕЕВ, асп.

Национальный исследовательский технологический университет МИСИС,
119049, Москва, Ленинский пр., 4, стр. 1, e-mail: olemakk@mail.ru

© Бухтеев О.М., 2025

Рассмотрены наиболее актуальные методики применения цифровых технологий для повышения эффективности эксплуатации дизельных двигателей погрузочно-доставочных машин. Проанализированы основные направления использования цифровых двойников, математического моделирования и систем мониторинга в реальном времени. Особое внимание уделено методам диагностики технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса силовых установок. Рассмотрены перспективы развития интеллектуальных систем технического обслуживания на основе технологий промышленного интернета вещей.

Ключевые слова: цифровые модели, дизельные двигатели, погрузочно-доставочные машины, диагностика, техническое обслуживание, цифровые двойники, математическое моделирование.

ВВЕДЕНИЕ

Горнодобывающая промышленность сегодня сталкивается с серьезными вызовами. Месторождения становятся все глубже, условия разработки усложняются, а требования к надежности оборудования возрастают. В этой ситуации погрузочно-доставочные машины (ПДМ) являются своего рода «рабочими лошадками» подземного транспорта, но их дизельные двигатели работают в крайне неблагоприятных условиях [1].

Традиционный подход к обслуживанию по регламенту часто приводит к парадоксальным ситуациям: либо производят замену еще работоспособных деталей, либо ждут полного отказа оборудования. Такая практика особенно болезненна для горных предприятий, где каждый часостояния ПДМ оборачивается значительными потерями [2]. Именно поэтому цифровые технологии в диагностике и эксплуатации дизельных двигателей привлекают все больше внимания. Возможность «заглянуть внутрь» работающего двигателя, не разбирая его, и спрогнозировать его поведение открывает принципиально новые перспективы [3].

ЦИФРОВАЯ ДИАГНОСТИКА: ОТ ПРОСТОГО К СЛОЖНОМУ

Развитие диагностических систем для дизельных двигателей прошло долгий путь. Если в 70-80-х годах прошлого века говорили о «документах на машинном носителе», то современные системы бортовой диагностики способны контролировать десятки параметров одновременно [4]. Однако не все параметры одинаково информативны для оценки состояния двигателя.

Специфика работы ПДМ накладывает свои ограничения на выбор диагностических методов. В отличие от автомобильных двигателей, которые работают в относительно предсказуемых условиях, силовые установки горных машин подвергаются воздействию экстремальных факторов [5]. Высокая запыленность, ограниченное охлаждение, резкие перепады нагрузки – все это создает уникальные условия их эксплуатации.

Компьютерная диагностика современных дизелей базируется на анализе сигналов, поступающих от множества датчиков [6]. Однако простое считывание кодов ошибок, как показывает практика, не всегда дает полную картину. Намного эффективнее оказывается анализ трендов – отслеживание того, как меняются ключевые параметры во времени [7].

Портативные анализаторы для диагностики крупных дизельных двигателей находят все более широкое применение в различных отраслях [8]. Для ПДМ это особенно актуально, поскольку возможности демонтажа и детальной диагностики в подземных условиях весьма ограничены. Такая машина представляет собой целый инженерный комплекс, сочетающий в себе функции погрузки и транспортировки больших объемов грузов в небольших замкнутых пространствах, без чего невозможно полноценное функционирование современного горного производства. Конструкцию ПДМ можно разделить на четыре основных элемента (рис. 1).

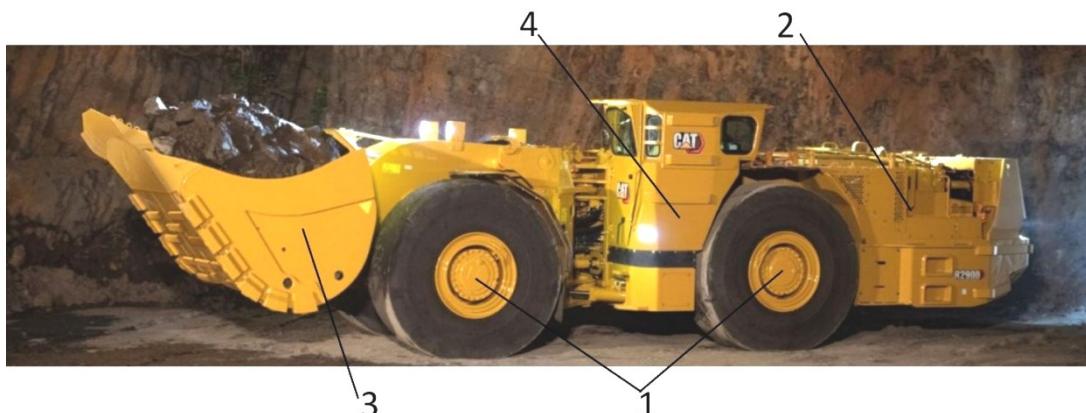


Рис. 1. Внешний вид ПДМ CAT R2900: 1 – ходовая часть; 2 – силовая установка; 3 – погрузочно-транспортный модуль; 4 – кабина оператора

Бортовые системы современных ПДМ способны фиксировать различные параметры в процессе работы, что и позволяет формировать комплексную цифровую картину процесса функционирования основных систем.

КОНЦЕПЦИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ: РЕАЛЬНОСТЬ ИЛИ ПЕРСПЕКТИВА?

Цифровой двойник – это виртуальная копия реального объекта, которая «живет» в компьютере и обновляется в режиме реального времени [9]. Для дизельных двигателей ПДМ такая технология имеет большие перспективы.

Опыт создания цифровых двойников морских газотурбинных двигателей в СПбПУ показывает серьезный потенциал этого направления [10]. Конечно, адаптация подобных решений для горных машин потребует учета специфики их эксплуатации, но основные принципы остаются теми же.

Главное преимущество цифровых двойников заключается в возможности проведения виртуальных экспериментов [11]. Можно «ломать» виртуальный двигатель

сколько угодно раз, изучая различные сценарии отказов и не рискуя при этом реальным оборудованием. Для ПДМ, где любая поломка чревата серьезными простоями, это особенно ценно.

Интересно, что цифровые двойники позволяют не только моделировать текущее состояние, но и прогнозировать поведение двигателя в различных условиях [12]. Такой подход открывает возможности для оптимизации режимов работы и предупреждения аварийных ситуаций.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Цифровые технологии базируются на комплексной математической основе [13]. Наиболее актуальные подходы к моделированию дизельных двигателей учитывают сложную физику процессов горения, теплообмена и механического взаимодействия деталей [14]. Так, эффективная мощность двигателя N_e зависит от многих параметров и определяется из выражения:

$$N_e = \frac{P_e \cdot V_{раб} \cdot n_B \cdot z_u \cdot z}{120}, \quad (1)$$

где P_e – среднее эффективное давление; $V_{раб}$ – рабочий объем камеры; n_B – число оборотов; z – число пар камер в двигателе; z_u – число совершаемых за один оборот вала рабочих циклов, рассчитываемое по формуле

$$z_u = \frac{2 \cdot i_B \cdot z_0}{t}, \quad (2)$$

где i_B – передаточное отношение привода; z_0 – число циклов изменения рабочего объема за один оборот ротора; t – число тактов цикла.

Особенность работы дизельных двигателей в составе транспортных средств заключается в необходимости учета динамических нагрузок [15]. Для ПДМ эта задача осложняется спецификой подземных условий – ограниченным пространством, повышенной влажностью, запыленностью.

Разработка математических моделей для двигателей внутреннего сгорания показывает, что наиболее эффективны комбинированные модели [16]. Они сочетают детерминированные физические законы со статистическими методами, что позволяет учесть как закономерности, так и случайные факторы.

Стоит отметить важность учета токсических характеристик дизельных двигателей [17], особенно в условиях подземных работ. Модели должны оценивать не только технические параметры двигателей [18], но и их влияние на окружающую среду и условия труда.

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА: ГЛАЗА И УШИ СОВРЕМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Современные системы мониторинга дизельных двигателей работают по принципу непрерывного сбора данных [19]. Для ПДМ такие системы должны быть особенно надежными, учитывая тяжелые условия эксплуатации, такие как вибрация и запыленность.

Телематические системы мониторинга, успешно применяемые для дизельных электростанций, демонстрируют высокую эффективность удаленного контроля [20]. Адаптация подобных решений для ПДМ требует учета специфики подземных условий, но основные принципы остаются применимыми.

Большое значение здесь имеет правильный выбор диагностических параметров. Не все показатели одинаково информативны для оценки состояния двигателя [21]. Для

дизельных двигателей ПДМ особое значение приобретают параметры, связанные с работой в запыленной среде и условиях ограниченного охлаждения.

Применение вероятностных методов распознавания неисправностей помогает повысить достоверность диагностики [22]. Это критически важно для ПДМ, где ложные сигналы о неисправностях могут привести к необоснованным простоям дорогостоящего оборудования [23].

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕСУРСА И ПЛАНИРОВАНИЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Одна из главных задач цифровых систем – научиться предсказывать, когда потребуется ремонт. Традиционные подходы, основанные только на учете мото-часов, показали свою недостаточность [24]. Фактический ресурс двигателя зависит от большого количества факторов, которые не учитывает простой подсчет наработанного времени.

Примером может служить комплексный анализ множества параметров и их изменения во времени [25]. Такой метод позволяет учесть индивидуальные особенности каждого двигателя и конкретные условия эксплуатации.

В качестве примера можно рассмотреть график результата расчета остатка мото-часов двигателя Caterpillar C9.3B (рис. 2) с использованием параметра «дымность» – натурального показателя ослабления светового потока, приведенного к шкале дымометра с базой 0,43 м согласно ГОСТ Р 51250-99 [26] и измеряемого в m^{-1} .

$$R = \frac{TS - TS_{np}}{\frac{d(TS)}{dt}} \cdot k_{\text{эксп}} , \quad (3)$$

где R – остаточный ресурс, мото-часы; TS – текущий интегральный показатель технического состояния; TS_{np} – предельное значение показателя технического состояния; $d(TS)/dt$ – скорость изменения интегрального показателя; $k_{\text{эксп}}$ – корректирующий коэффициент условий эксплуатации, показывающий поглощение света при его прохождении через отработанные газы.

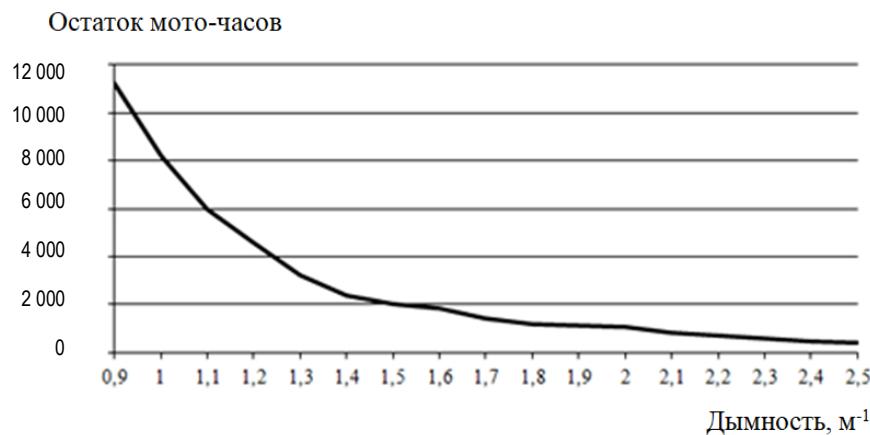


Рис. 2. Зависимость остаточного ресурса двигателя Caterpillar C9.3B от показателя дымности

Байесовские методы обновления параметров прогнозных моделей обеспечивают адаптацию системы к накапливаемому опыту [27]. Это особенно важно для ПДМ, поскольку каждое месторождение имеет свои уникальные условия эксплуатации.

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ: СЕТЕВОЙ ЭФФЕКТ

Интеграция дизельных двигателей ПДМ в экосистему промышленного интернета вещей открывает новые горизонты [28]. Когда все машины «общаются» между собой и с центральной системой управления, появляется возможность оптимизировать работу парка техники в целом.

Технологические машины все чаще оснащаются интеллектуальными системами самодиагностики [29]. Это создает предпосылки для реализации концепции «умных» горных предприятий [30], где оборудование само сообщает о своих потребностях в обслуживании: дизельный двигатель ПДМ самостоятельно анализирует состояние систем и заблаговременно «просит» заменить фильтр или провести регулировку топливной аппаратуры [31].

Особенно интересны возможности коллективного «обучения» парка машин. Если одна ПДМ сталкивается с проблемой в определенных условиях, эта информация может предупредить аналогичные ситуации на других машинах [32]. Беспроводные сенсорные сети, адаптированные для подземных условий, решают проблему передачи данных в сложной инфраструктуре подземных выработок [33].

ОСОБЕННОСТИ ГОРНЫХ УСЛОВИЙ И ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Горнодобывающая промышленность предъявляет особые требования к надежности оборудования [34]. Дизельные двигатели ПДМ в основном работают в тяжёлых условиях, сильно отличающихся от стандартных условий эксплуатации автотранспорта. Подземные выработки – это агрессивная среда с высокой влажностью, запыленностью и ограниченной вентиляцией.

Техническая эксплуатация горных машин имеет свою специфику [35]. Ограниченный доступ к оборудованию, сложность эвакуации неисправных машин и высокая стоимость простоев делают стратегию предиктивного обслуживания не просто желательной, а фактически необходимой.

Внедрение цифровых технологий требует значительных первоначальных инвестиций, но экономический эффект в долгосрочной перспективе может быть весьма существенным [36].

Нельзя забывать и о человеческом факторе. Снижение количества внезапных отказов ПДМ означает не только экономию средств, но и повышение безопасности труда горняков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение цифровых моделей для совершенствования эксплуатации дизельных двигателей ПДМ представляет собой закономерный этап развития горнодобывающей промышленности. Сочетание цифровых двойников, систем реального времени мониторинга и математического моделирования позволяет перейти от реактивного к проактивному подходу в обслуживании оборудования.

Наибольшую ценность эти технологии приобретают в условиях усложнения горно-геологических условий и повышения требований к экологической безопасности. Цифровизация процессов эксплуатации дизельных двигателей ПДМ – это практическая необходимость для создания эффективных и безопасных горнодобывающих предприятий.

Однако полная реализация потенциала цифровых технологий потребует решения ряда технических и организационных задач. Но направление развития определено, и первые успешные примеры уже демонстрируют перспективность выбранного пути.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хорешок А.А., Кудреватых А.В., Кузнецов В.В. Характеристика методов технического обслуживания горно-транспортного оборудования // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № S5. С. 48–61.
2. Диагностика дизельных двигателей. Приборы для диагностики дизеля // ЭДИАЛ. 2024. URL: <https://www.edial.ru/articles/edial-sposobi-diag-diz-dvig/> (дата обращения: 20.05.2025).
3. Цифровые двойники и численное моделирование: разбираем технологии // Добывающая промышленность. 2021. 22 ноября. URL: <https://dprononline.unsolution/tsifrovye-dvojnikи-i-chislennoe-modelirovanie-razbiraem-tehnologii/> (дата обращения: 20.05.2025).
4. Диагностика и ремонт дизельных двигателей: как обеспечить долгосрочную работу вашей техники // Влпасифик. 2025. 19 марта. URL: <https://vlpacific.ru/article/diagnost/> (дата обращения: 20.05.2025).
5. Компьютерная диагностика дизельных двигателей // Дизель-Мотор. 2020. URL: <https://www.dieselmotors-spb.ru/diagnostika-dizelnyh-dvigatelej.html> (дата обращения: 20.05.2025).
6. Диагностика дизельных двигателей – исследование ЗР // За рулем. 2017. 28 сентября. URL: <https://www.zr.ru/content/articles/908489-doktor-dizel/> (дата обращения: 20.05.2025).
7. Портативные анализаторы дизельных двигателей // SmartTools. 2021. 11 февраля. URL: <https://smarttools.pro/catalog/diagnostika-dizelnyh-dvigatelej/> (дата обращения: 20.05.2025).
8. Digital Twin – цифровая копия физической системы // Хабр. 2025. 4 марта. URL: <https://habr.com/ru/articles/887936/> (дата обращения: 20.05.2025).
9. Цифровой двойник морского газотурбинного двигателя // Центр НТИ СПбПУ «Новые производственные технологии». 2023. URL: https://nticenter.spbstu.ru/nti_projects/71 (дата обращения: 20.05.2025).
10. Цифровой двойник морского газотурбинного двигателя: итоги трех этапов (2021–2023 гг.) // FEA.RU | CompMechLab. 2024. URL: <https://fea.ru/project/236> (дата обращения: 20.05.2025).
11. What Is a Digital Twin? // IBM. 2025. 20 мая. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/what-is-a-digital-twin> (дата обращения: 20.05.2025).
12. Цифровые и интеллектуальные технологии // ОДК. 2024. URL: <https://www.uecrus.com/innovations/tsifrovye-i-intellektualnye-tehnologii/> (дата обращения: 20.05.2025).
13. Симуков И.В. Математическое моделирование основных технических параметров двухблочного роторного двигателя внутреннего сгорания новой конструкции: дис. ... канд. техн. наук. Брянск, 2009. 193 с.
14. Балагин О.В., Чулков А.В., Балагин Д.В., Якушин Р.Ю. Математическое моделирование процесса технической эксплуатации автономных локомотивов // *Молодой ученый*. 2017. № 4 (138). С. 3–7.
15. Аверченков В.И., Федоров В.П., Хейфец М.Л. Основы математического моделирования технических систем. Брянск: Изд-во БГТУ, 2004. 271 с.
16. Евтухов А.В. Моделирование токсических характеристик автотранспортных средств с дизельными двигателями // *iPolytech Journal*. 2006. Т. 4. № 4 (28). С. 84–87.
17. Старокожев М.А. *Теоретические основы разработки двухблочного роторно-поршневого двигателя методом математического моделирования*: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2013. 171 с.

18. Диагностика дизельных двигателей // ТМ-Сервис. 2024. URL: <https://tm-service.ru/diagnosticheskie-raboty/diagnostika-dizelnykh-dvigateley/> (дата обращения: 20.05.2025).
19. Контроль и мониторинг дизельных электростанций ДЭС и ДГУ // MONTRANS. 2024. URL: <https://montrans.ru/resheniya/monitoring-des> (дата обращения: 20.05.2025).
20. Диагностика топливной системы дизельного двигателя // Форсунка-Питер. 2024. URL: <https://forsunka-piter.ru/stati/diagnostika-toplivnoj-sistemy-dizelnogo-dvigatelya.html> (дата обращения: 20.05.2025).
21. Кулагин А.В. Диагностирование состояния судовых дизельных двигателей вероятностным методом распознавания неисправностей // *Научные проблемы водного транспорта*. 2021. № 69. С. 109–122.
22. Jiang J., Li H., Mao Z., Liu F., Zhang J., Jiang Z., Li H. A digital twin auxiliary approach based on adaptive sparse attention network for diesel engine fault diagnosis // *Scientific Reports*. 2022. V. 12. № 1. P. 675–693.
23. Александров А.В., Алексахин С.В., Долгов И.А. [и др.]. Техническая эксплуатация, диагностирование и ремонт двигателей внутреннего сгорания: учебник. М.: ИНФРА-М, 2023. 544 с.
24. Bondarenko A., Fukuda T. Development of a diesel engine's digital twin for predicting propulsion system dynamics // *Energy*. 2020. V. 196. P. 117–126.
25. ГОСТ Р 51250-99. Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Дымность отработавших газов. Нормы и методы определения. М.: Издательство стандартов, 1999. 19 с.
26. Калачин С.В., Кухмазов К.З., Мурог И.А., Определение эффективного алгоритма машинного обучения для прогнозирования режимов работы дизельного двигателя // *Нива Поволжья*. 2023. № 2. С. 66–73.
27. Техническое обслуживание дизельного двигателя – что нужно знать? // Дизель-Мотор. 2020. URL: <https://www.dieselmotors-spb.ru/informatsiya/tehnicheskoe-obsluzhivanie-dizelnhogo-dvigatelya-chto-nuzhno-znat.html> (дата обращения: 20.05.2025).
28. Гоголев Г.В. Эксплуатация современных судовых дизельных установок: учебное пособие. М.: Инфра-Инженерия, 2024. 460 с.
29. Точная настройка предприятия: цифровые двойники // Controleng.ru. 2021. 26 января. URL: <https://controleng.ru/innovatsii/cifrovye-dvojnik/tochnaya-nastrojka/> (дата обращения: 20.05.2025).
30. Yang X., Bi F., Cheng J., Tang D., Shen P., Bi X. A Multiple Attention Convolutional Neural Networks for Diesel Engine Fault Diagnosis // *Sensors*. 2024. V. 24. № 9. P. 2708.
31. Singh R.R., Bhatti G., Kalel D., Vairavasundaram I., Alsaif F. Building a Digital Twin Powered Intelligent Predictive Maintenance System for Industrial AC Machines // *Machines*. 2023. V. 11. Is. 8. P. 796.
32. Fu Y., Zhu G., Zhu M., Xuan F. Digital Twin for Integration of Design-Manufacturing-Maintenance: An Overview // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2022. V. 35. № 1. P. 80.
33. Горные машины и комплексы для добычи руд // Геологический портал GeoKniga. 2018. URL: <http://www.geokniga.org/books/14895> (дата обращения: 20.05.2025).
34. Герике Б.Л., Абрамов И.Л., Герике П.Б., Стратегия технического обслуживания горных машин по фактическому состоянию на основе методов вибродиагностики и неразрушающего контроля // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2008. № 3. С. 11–14.

35. Хорош А.И., Хорош И.А. Дизельные двигатели транспортных и технологических машин: учебное пособие. М.: Лань, 2020. 176 с.

Для цитирования: Бухтеев О.М. Применение цифровых моделей для совершенствования процесса эксплуатации и диагностики дизельных двигателей погрузочно-доставочных машин // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 38–45.

THE APPLICATION OF DIGITAL MODELS TO IMPROVE THE OPERATION AND DIAGNOSTICS PROCESS OF DIESEL ENGINES IN LOAD-HAUL-DUMP MACHINES

О.М. BUKHTEEV, Postgraduate

National Research Technological University "MISIS",
Building 1, 4, Leninsky pr., Moscow, 119049, e-mail: olemakk@mail.ru

The most relevant techniques for applying digital technologies to improve the efficiency of diesel engines in load-haul-dump (LHD) machines are examined. The main areas of utilizing digital twins, mathematical modeling, and real-time monitoring systems are analyzed. Special attention is given to methods for diagnosing technical conditions and predicting the remaining service life of power units. The prospects for developing intelligent maintenance systems based on Industrial Internet of Things (IIoT) technologies are explored.

Keywords: digital models, diesel engines, load-haul-dump machines, diagnostics, maintenance, digital twins, mathematical modeling.

Поступила в редакцию/received: 24.06.2025; после рецензирования/revised: 30.06.2025;
принята/accepted: 03.07.2025

УДК 622.2

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-45-63

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САПОНИТСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

А.С. ДАНИЛОВ¹, канд. техн. наук, Э.А. КРЕМЧЕЕВ², д-р техн. наук,
Н.М. МАГДЕЕВА¹, студ.

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
199106, Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., д. 2, e-mail: Danilov_AS@pers.spmi.ru

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
190121, Санкт-Петербург, ул. Союза Печатников, д. 16, e-mail: kremcheev@mail.ru

© Данилов А.С., Кремчеев Э.А., Магдеева Н.М., 2025

Статья посвящена описанию современных технологий переработки сапонитсодержащих отходов, широко применяемых для очистки сточных вод в строительстве и сельском хозяйстве. Рассмотрены состав и основные свойства указанных отходов. Проанализированы различные способы сгущения сапонитсодержащих

сусpenзий с указанием их преимуществ и недостатков. Приведены наиболее перспективные направления дальнейшего изучения сапонитсодержащих отходов и технологий их переработки.

Ключевые слова: сапонитсодержащая руда, сапонит, глинистая сусpenзия, сорбционные свойства, буровой раствор, взвешенные частицы, сорбент, мелиорант, удобрение, добавка.

ВВЕДЕНИЕ

В Российской Федерации на территории Мурманской и Архангельской областей находятся невостребованные запасы глины (около 32,83 млн т), преимущественно образованной сапонитом – побочным продуктом алмазодобывающей промышленности [1]. Он представляет собой тяжелый минерал, сбрасываемый в открытые водные объекты. Рассматривается возможность использования данного сырья в качестве основы сорбентов [2, 3]. Экспериментально доказаны сорбционные свойства сапонита по отношению к различным металлам и его сходство с другими адсорбентами природного происхождения [4]. Значительная часть исследований сапонитовой глины направлена на изучение ее как мелиоранта, удобрения [5], строительного материала [6], бурового раствора [7]. Сапонит также применяется в качестве кормовой добавки для выращивания цыплят-бройлеров, гусей и кроликов [8, 9].

В период с 2014 по 2025 годы в рамках Федеральной целевой программы «Ликвидация накопленного экологического ущерба» уже на стартовом этапе было выявлено 340 объектов накопленного экологического ущерба [10, 11], что указывает на актуальность проблемы утилизации сапонитсодержащего шлама.

Экспериментальные исследования и проведенный анализ минерального состава [7] показывают, что среди минералов, содержащихся в глинистой взвеси, лидирует сапонит (табл. 1).

Таблица 1. Минеральный состав глинистых взвесей, поступающих на обогащение в поверхности хвостохранилищ [7]

Минерал	Структурная формула	Плотность, кг/м ³	Твердость по Моосу	Содержание, % по массе
Доломит	CaCO ₃ MgCO ₃	2 940	4,0	19,9
Каолинит	Al ₄ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	2 600	1,5	21,8
Сапонит	(Ca _{0,5} Na) _{0,3} [Mg, Fe ²⁺] ₃ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·4H ₂ O	2 500	2,5	24,5
Серпентит	Mg ₆ [Si ₄ O ₁₀](OH) ₈	2 200	2,5	19,2
Байделлит	(Na, Ca) _{0,3} Al ₂ (Si, Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ nH ₂ O	2 150	1,0	14,6
Итого				100

Предприятие, разрабатывающее алмазное месторождение в Архангельской области, нацелено на обеспечение эффективной и безопасной добычи полезных ископаемых на основе современных технологических решений. Для этого были отобраны пробы используемой оборотной и карьерной воды, подобраны и разработаны

коагулянты, позволяющие перерабатывать образующиеся на предприятии объемы пустой породы в новый продукт. Установлено, что применение сульфатов щелочных металлов для разделения мельчайших глинистых частиц, в основном состоящих из сапонита, представляется весьма перспективным направлением [12].

Размерно-массовые характеристики и физико-химические свойства сапонита обуславливают высокую устойчивость образуемых им суспензий к осаждению. Существуют различные химические вещества, выступающие в роли коагулянтов и флокулянтов, которые позволяют осаждать мелкодисперсные частицы, уменьшая экологический ущерб [13]. Получаемый осадок содержит достаточно калия и магния для производства минерального удобрения, а высушенная глина может быть использована в качестве наполнителя в производстве морозостойкого бетона [12].

На месторождении содержание алмазов составляет ничтожно малую долю – 0,000 042 %, соответственно, на каждую тонну переработанной руды образуется 99,999 958 % сапонитовых отходов, которые направляются в хвостохранилище [14]. В среднем для обогащения алмазов обогатительной фабрике необходимо 2 600 м³/ч свежей воды с нормативным содержанием 0,5 г/л твердого вещества. В оборотной воде содержится 6...120 г/л взвешенных веществ, что из-за наличия трудноосаждаемых частиц, представленных сапонитом, требует введения дополнительных объемов воды. Следовательно, для сокращения объемов сброса тяжелого минерала в открытые водные объекты необходим переход на комплексную переработку сапонитсодержащей руды [1, 14, 15].

Для решения проблемы уменьшения воздействия на экосистему больших объемов отходов при их складировании и хранении разрабатываются подходы по практическому применению сапонитсодержащей руды для производства силикатных строительных материалов, гидроизоляции при обустройстве полигонов хранения твердых бытовых отходов и радиоактивных могильников, фильтрации сточных вод, а также в медицине.

Широко рассматривается вопрос об использовании сапонита при производстве искусственных почвогрунтов [16]. Такие грунты можно применять вместо естественного растительного грунта при рекультивации нарушенных территорий, свалок промышленных и бытовых отходов и т. п. Проведенные И.В. Тельминовым и его коллегами [17] лабораторные эксперименты показали, что оптимальный состав искусственного грунта для выращивания травы содержит 80 % хвостов и по 10 % торфа и обезвоженного активного ила [17]. Этот состав может быть также использован для изоляции свалок (бытовых и промышленных), карьеров, что способствует решению проблемы утилизации отходов, сохранению объемов естественного растительного грунта и снижению затрат на рекультивацию. Предлагаемые почвогрунты применимы для укрепления откосов дамб, рекультивации свалок, обустройства санитарно-защитных зон предприятий [16].

Разработка месторождений сопряжена с использованием больших территорий под размещение производственных объектов, что приводит к масштабным и долговременным нарушениям компонентов природной среды [18]. На территории Российской Федерации ежегодный прирост объема руды, содержащей от 10 до 99 % сапонита, превышает 3 млн т [19]. Несмотря на то, что объемы образования сапонитсодержащих отходов на профильных горнодобывающих предприятиях огромны и, присутствуя в виде суспензии в промышленной воде, они затрудняют ее повторное использование, технологически возможно сделать производство условно безотходным с соответствующей утилизацией данного вида минерала [1–3].

На рис. 1 показана карта производственного процесса, демонстрирующая соотношение складируемых отходов к добытой руде. Так, на конец 2020 года в пруд-отстойник заскладировано около 8,23 млн т хвостов, в хвостохранилища отправлено 24,6 млн т [20].



Рис. 1. Производственная площадка: 1 – склад руды; 2 – обогатительная фабрика; 3 – трубопровод; 4 – отвал пустых пород; 5 – хвостохранилище [20]

В целях минимизации негативного воздействия на экосистему как один из возможных вариантов использования сапонитовой пульпы следует рассматривать применение ее в качестве бурового раствора, сорбента, мелиоранта и компонента строительных смесей. Вовлечение в производственный процесс отходов горного производства в виде сапонитовой руды позволит, наряду со значительным экономическим эффектом, существенно уменьшить объемы шламов в хвостохранилищах.

Целью данного обзорного исследования стало выявление наиболее перспективных с экономической и безопасных с экологической точек зрения путей использования сапонитсодержащих отходов в рамках концепции экономики замкнутого цикла.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материалов исследования рассматривались публикации в научных журналах, в той или иной мере затрагивающие тему образования и повторного использования сапонитсодержащих отходов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Актуальность очистки сапонитсодержащих техногенных вод обусловлена необходимостью организации качественной системы водооборота, обеспечивающей высокое извлечение алмазов в процессах обогащения, снижение экологической нагрузки на окружающую среду и попутное получение целевых товарных продуктов [22].

В статье А.Ю. Облицова приведены характеристики смектитов и указано их содержание: «Потребность обогатительной фабрики в оборотной воде составляет $450 \text{ м}^3/\text{ч}$ с содержанием твердых частиц не более $5 \text{ г}/\text{л}$. Осветление оборотной воды на хвостохранилище происходит с добавлением флокулянта, расход которого составляет $135 \text{ г}/\text{т}$. Минеральный состав твердых частиц на 70% представлен глинистыми минералами, самопроизвольно диспергирующими в водной среде с образованием гелеобразных коллоидно-дисперсных трудносгущаемых частиц твердого» [22].

При попадании в водную среду сапонит образует тонкодисперсную суспензию с низкой скоростью седиментации и невысокой плотностью образующегося осадка. Он приводит к снижению прочностных свойств элементов намывных дамб, отлагаясь в породах, что в свою очередь негативно влияет на их устойчивость. Кроме того, низкая скорость осаждения сапонитовой суспензии затрудняет осветление воды в нужном количестве для реализации замкнутого контура водопотребления [23]. Способы сгущения сапонитсодержащей суспензии приведены в табл. 2.

Таблица 2. Способы сгущения сапонитсодержащей суспензии

Название 1	Суть метода 2	Достоинства 3	Недостатки 4
Замораживание и последующее оттаивание суспензии в прудковой части хвостохранилищ	Технологический процесс обеспечивает четырехкратное уплотнение сапонитовой массы за счет коагуляционной перестройки частиц. Полученный осадок, пригодный для транспортировки и складирования, направляется в карты-хранилища [26]	Способ учитывает погодные условия региона. Циклическое замораживание-оттаивание приводит к прогрессирующему уплотнению осадка, скелет полученного осадка достигает плотности $0,53 \text{ г}/\text{cm}^3$, что в 3 раза превышает исходный показатель [26]	Обратимость процесса, необходим значительный землеотвод и большие материальные затраты на обустройство и организацию работ [26]. В летний период после сброса осветленной воды плотность сгущенного сапонита не превышает $0,7 \text{ т}/\text{м}^3$ (этого недостаточно для промышленного применения и использования в качестве сырья) [28]

Продолжение табл. 2

1	2	3	4
Осаждение частиц с последующим введением углекислого газа и обработкой коагулянтом	Обработка сапонитовой суспензии CO_2 под давлением (2 кгс/см ² , 300 г/кг осадка) разрушает структуру: выделяются карбонаты Mg/Ca, образуются свободные места, на которые встают ионы водорода или металлов, что способствует агрегации частиц [27]	Быстрое сгущение пульпы на больших площадях и получение чистой оборотной воды [27]	Происходит образование карбонатов кальция и магния – растворимых соединений, которые переходят в жидкую часть пульпы, повышая ее минерализацию. При введении коагулянта – серно-кислого алюминия образуется сульфат железа (III) – растворимое соединение, также повышающее минеральность суспензии [28]
Осаждение частиц с обработкой коагулянтом [28] (оксихлоридом алюминия)	Разбавленный слив классификатора (1 250...1 350 кг/м ³) обрабатывается в сгустителе коагулянтом – оксихлоридом алюминия (15 % Al_2O_3) при перемешивании разделяется на очищенную воду, поступающую в цикл, и сгущенный осадок, отводящийся в хвостохранилище [28]	Получение очищенной воды в соответствии с СанПиН 2.1.5.980-00 с вовлечением в процесс очистки всех технологических вод. Получение осадка сгущенной твердой фазы для конусного складирования [28]	Требуются дополнительные утяжелители. Отсутствует уплотненность осадка. Начинает работать при pH среды выше 5,5, необходимо добавление щелочи. Утилизация осадка (4-й класс) [15, 28]
Отстаивание и выделение сапонита с помощью раствора $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Разбавление пульпы водой, отстаивание, отделение осветленной сапонитовой суспензии от песка. Добавление раствора $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в NaOH , перемешивание и отстаивание для выделения сапонита [29]	Высокая степень очистки. Простота и воспроизводимость с использованием простых реагентов [29]	Длительность процесса отстаивания. Ограниченнная эффективность при высоких концентрациях взвеси [29]

Продолжение табл. 2

1	2	3	4
Реагенты-флокулянты – природные или синтетические высоко-молекулярные вещества	Использование щелочных металлов (K^+/Na^+) приводит к замещению ионов Mg^{2+}/Ca^{2+} в двойном электрическом слое, уменьшая его толщину и высвобождая воду. Одновременно образование малорастворимого сульфата кальция усиливает агломерацию частиц, обеспечивая быстрое осаждение, повышенный выход воды и предотвращает пылеобразование [12]	Применение флокулянтов для осветления оборотной воды требует минимального количества реагента, концентрация которого может варьировать в широком диапазоне (0,005–0,0 005 %), что облегчает управление технологическим процессом осветления и снижает вероятность его сбоев в случае изменения технологических условий, количества и состава исходной пульпы [26]	Плотность и пористость образующегося осадка остаются на уровне, сопоставимом с показателями естественного осаждения [26]

Продолжение табл. 2

1	2	3	4
Флокулянты на основе полиакриламида (катионные и анионные)	<p>Добавление малых количеств (0,02 %) частично гидролизованного полиакриламида с молекуллярной массой $1,2 \cdot 10^7$ в водоемы позволяет снизить скорость испарения воды на 14 %.</p> <p>Флокулянты подвергаются гидролизу в присутствии кислот и щелочей. В экспериментальных условиях гидролиз проводится с добавлением гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) [15]</p>	<p>Интенсивное осаждение взвесей. Минимальный расход реагента.</p> <p>Выгодная стоимость: товарная цена 360 руб/кг, при расходе 250 кг затраты составят 90 тыс. руб. (российское производство) [15]</p>	<p>Токсичность: класс опасности: токсичен (допустимая концентрация $\leq 2,0$ мг/кг). Пожароопасность: образует горючие пылевые облака в воздухе. Взрывоопасность: способен формировать взрывоопасные пылевые смеси.</p> <p>Повышенная плотность воды после обработки. Применение реагента увеличивает плотность очищенной воды.</p> <p>Аbrasивный износ оборудования.</p> <p>Растворенные сополимеры (включая акриламид) ускоряют коррозию и износ механизмов.</p> <p>Термочувствительность: при высоких температурах возможно застывание и поликристаллизация.</p> <p>Логистические затраты включают расходы на закупку и транспортировку реагента до месторождения.</p> <p>Налоговая нагрузка: учитывается НДС при закупке материалов.</p> <p>Экологические ограничения: запрещен сброс в канализацию, грунтовые и поверхностные воды [15]</p>

Окончание табл. 2

I	2	3	4
Коагулянты сернокислого или хлористого алюминия	<p>Введение раствора сульфата/хлорида алюминия, используемого в качестве коагулянта, вызывает дестабилизацию системы и агрегацию частиц $\text{NaMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и с гидроксидом алюминия, ускоряя осаждение, но не изменяя плотность и пористость осадка, которые остаются на уровне естественного отстаивания [13]</p>	Простота и скорость технологического процесса	Не изменяется пористость и плотность осадка. Сульфат алюминия при гидролизе проявляет значительную химическую активность, что приводит к коррозионному воздействию на оборудование. В ходе реакции образуется серная кислота, которая диссоциирует с выделением ионов гидроксония (H_3O^+), в связи с чем требуется использование коррозионностойких материалов и контроль pH [15]

Исследования, проведенные О.С. Зубковой с коллегами, показывают, что содержание химических соединений в сапонитах составляет:

в верхнем слое: $\text{CaO} - 2-2,57\%$; $\text{MgO} - 20,99\%$; $\text{SiO}_2 - 26,30\%$; $\text{K}_2\text{O} - 1,23\%$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 7,92\%$;

в нижнем слое: $\text{CaO} - 21,48\%$; $\text{MgO} - 19,75\%$; $\text{SiO}_2 - 27,41\%$; $\text{K}_2\text{O} - 1,31\%$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3 - 8,23\%$ [3].

Сапонит входит в группу монтмориллонитов кремниевых пород, минерал бледно-розового цвета, без запаха и вкуса. Общая химическая формула имеет вид $(\text{Ca}_{0,5}\text{Na})_{0,3}[\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}]_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ [24].

Процесс добычи ведется в сложных природных условиях при неразвитой региональной инфраструктуре. Это делает проблему очистки воды актуальной и требующей комплексного решения. Помимо сапонита основными сопутствующими минералами при добыче алмазов являются легкие глинистые минералы: доломит, каолинит, серпентин [25].

Применение сапонитсодержащих материалов в качестве бурового раствора

Буровой раствор оказывает значительное влияние на технико-экономические показатели и качество строительства скважины [30]. На данный момент для бурения используется в основном бентонитовая глина, которая делает буровой раствор более термо- и солестойким, чем растворы, полученные из их индивидуальных глин, поскольку бентонит, как и сапонит, относится к жирным глинам [31, 32].

Замасленные глины проявляют гидрофобные свойства и смазывают металлические части буровой установки, что позволяет снизить коэффициент трения в

металлических контактных парах. Использование отработанных жирных глинистых адсорбентов после изготовления буровых растворов помогает также в утилизации выбросов твердых отходов с хвостохранилищ [32]. К монтморилонитовой группе относятся минералы сапонит, бейделлит, нонtronит, вермикулит. Глины, в которых преобладают минералы этой группы, называют бентонитами [33]. Физические свойства сапонитовой и бентонитовой глины приведены в табл. 3.

Большей частью свойства двух рассматриваемых минералов близки. Можно выделить адсорбционные, ионообменные, каталитические и фильтрационные свойства. М.А. Пашкевич и А.В. Алексеенко [34] указывают на то, что благодаря своим уникальным структурным и химическим свойствам сапонит более эффективно по сравнению с бентонитом задерживает и обезвреживает загрязняющие вещества.

Таблица 3. Сравнение физических свойств сапонитовой и бентонитовой глины

Свойство	Состав, группа	
	Сапонит	Бентонит
	$(Ca_{0,5}Na)_{0,3}[Mg,Fe^{2+}]_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O$ Является разновидностью обширного семейства бентонитов и относится к группе монтмориллонитов	$Al_2[Si_4O_{10}](OH)_2 \cdot nH_2O$ Представляет собой тонкодисперсные глины, состоящие не менее чем на 60...70 % из минералов группы монтмориллонита
Набухание, %	5,6...6,0	5,1...5,8
Удельный вес, кг/м ³	2 700...3 150	2 500...2 760
Пластичность, %	28,4	42
pH	6,5...7,0	6,0...9,5

Сапонит может быть использован в качестве недорогого сырья для изготовления буровых растворов [7], причем он не уступает по свойствам бентонитовой глине.

Опыты, проведенные Э.Ю. Георгиевой, О.С. Зубковой, М.А. Торопчиной [7] на соответствие физических свойств образцов 88 и 100 г/л сапонитовой пульпы, показали, что результаты удовлетворяют требованиям, предъявляемым к буровым растворам (табл. 4).

Таблица 4. Результаты определения физических свойств сапонитового шлама [7]

Определяемый показатель	Содержание твердого в пульпе, г/л	
	88	100
Плотность ρ , г/см ³	1,055	1,060
CHC, дПа*	5	5
CHC ₁₀ , дПа*	10	10
Условная вязкость, с	18	20
Водоотдача, см ³ /30 мин	24	22

* Статическое напряжение сдвига через 1 и 10 мин соответственно.

Для снижения потерь воды при фильтрации используется метод кольматации песков суспензией твердых частиц [35, 36]. Исследования показывают, что при фильтрации глинистой взвеси в пористой среде происходит накопление дисперсных частиц. А.Л. Невзоровым с коллегами установлено, что осаждение сапонита на перфорированном вкладыше не происходит при скорости фильтрации суспензии $\geq 3,5$ м/сут [36]. Таким образом, регулирование этого параметра является критически важным фактором [36, 37].

Выход раствора для сапонитового глинородника с вязкостью 20 мПа·с составляет 10 м³/т. Для бентонитовых глин данный показатель варьируется в диапазоне 8...16 м³/т [23].

Для быстрого бурения необходим термостабильный буровой раствор с высокой смазывающей способностью и устойчивостью к химическому воздействию пластовых вод [37–39].

Для минимизации набухания глин и стабилизации пород применяются амфильтрующие вещества (гидрофобные комплексы) [40]. Они образуют защитные адсорбционные слои на частицах глины и оборудования. Сорбированные масла в отработанном адсорбенте взаимодействуют с пластовой водой, формируя барьер, который блокирует поры и микротрешины, предотвращая набухание [41].

Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года, ключевой задачей нефтяной промышленности является развитие внутреннего рынка. В структуре нефтесервисного инжиниринга бурение скважин занимает ведущее место [42]. В этом контексте применение сапонита в качестве бурового раствора рассматривается как перспективное и экономически выгодное направление.

Применение сапонитсодержащих материалов

в качестве строительного материала

Сапонитсодержащие отходы, представляющие собой глинисто-магнезиальное сырье, могут применяться в производстве:

керамического кирпича и стеновых материалов (керамических, прессованных); цементного клинкера [43, 44].

Функции сапонита в строительных материалах:

активная минеральная добавка, замена энергоемкого клинкера [45, 46]; источник алюминия и железа [47], частично или полностью замещающий глину и пиритные огарки;

глинистый компонент в расширяющих добавках для получения безусадочных цементов [44].

Оптимальный состав добавки для цемента: 15 % мела, 30 % сапонитсодержащих туфов, 55 % фосфогипса (доля в цементе – 15 %) [48].

Исследования показали, что использование высокодисперсного сапонитсодержащего материала в составе портландцемента:

повышает прочность бетона в 1,6 раза;
увеличивает морозостойкость с F100 до F300;
улучшает водонепроницаемость с W6 до W10 [47].

Кроме того, сапонитсодержащие туфы, благодаря их химическому составу и термостойкости, перспективны для производства керамики, стекла и стеклокристаллических материалов [44].

Разработан способ производства добавки на основе сапонитсодержащего минерального осадка [16, 50]. В процессе гидратации компонентов смеси образуются новые гидросиликаты, что усиливает твердение бетона [43].

Применение сапонитсодержащих материалов в качестве сорбента

Сапонитсодержащие материалы эффективны для очистки вод от тяжелых металлов.

Ключевые исследования

Работы В.Г. Миненко, О.С. Зубковой, О.В. Черемисиной раскрывают механизм сорбции ионов металлов модифицированными сапонитами [44–46].

Исследования О.С. Зубковой подтвердили, что сапонитовые гранулы адсорбируют 72 % ионов меди (Cu^{2+}) в статических условиях и могут использоваться для очистки водных растворов.

В гальваническом производстве эффективность удаления Cu^{2+} из сточных вод достигает 94 % [1].

Кислотная промывка насыщенных сапонитов позволяет извлечь до 96,8 % меди и до 95,3 % никеля с получением концентрированных растворов ($Cu > 5 \text{ г/дм}^3$, $Ni > 2,5 \text{ г/дм}^3$).

Практическое применение: лабораторные испытания подтвердили, что сапонитсодержащие сорбенты очищают воду до уровня ПДК для рыбохозяйственных водоемов.

Наибольшие концентрации химических элементов были зафиксированы в образцах, подвергнутых кислотной обработке и активации минерала. Влияние кислотной активации на содержание примесных химических элементов в сапонитах отражено в табл. 5. Проведенные исследования демонстрируют, что кислотная активация способствует формированию значительного количества поверхностных кислотных центров в структуре сапонитов, что, в свою очередь, определяет их повышенную катионаобменную активность.

Таблица 5. Влияние кислотной активации на содержание примесных химических элементов в сапонитах [47]

Группы образцов	Характеристика образцов	Содержание элементов					
		Fe, %	Rb, г/т	Sr, г/т	Y, г/т	Zr, г/т	Nb, г/т
1	Минерал природный	11,11	12	41	21	66	4
2	Минерал очищенный	10,95	13	47	20	75	2
3	Минерал активированный HCl (0,1 моль/л)	10,82	15	47	22	82	2
4	Минерал активированный HCl (0,15 моль/л)	10,05	18	48	23	76	3

Смектиты представляют значительный научный и практический интерес в силу их широкой распространенности, технологичности переработки, а также высокой сорбционной емкости по отношению к газам, молекулам органических и неорганических соединений, а также растворенным ионам.

Применение сапонитов в агрохимии

С момента открытия сапонитовых месторождений ведутся исследования по их использованию в качестве компонента удобрений. В частности, сапониты применяются в сельском хозяйстве для детоксикации почв (включая сорбцию гербицидов, пестицидов и тяжелых металлов), а также используются в качестве наполнителя и гранулята.

Высокая дисперсность и значительные силы поверхностной адсорбции сапонитов оказывают влияние на повышение содержания подвижных форм фосфора и калия в почве.

Прибавка урожая варьировалась в пределах 9...18 ц/га (рис. 2), причем наиболее высокий результат был зафиксирован при минимальной дозе внесения сапонитсодержащих материалов (3,6 т/га), что свидетельствует о высокой агрономической эффективности этого удобрения в условиях Архангельской области [22].

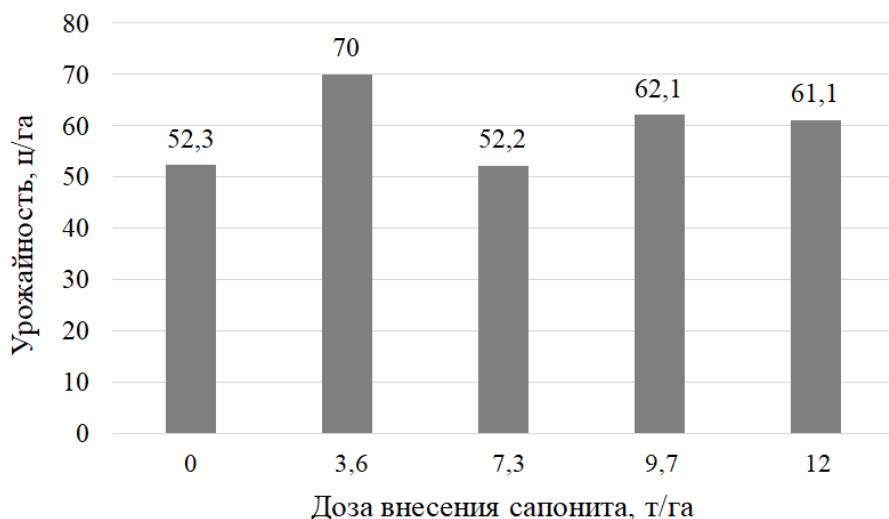


Рис. 2. Урожайность картофеля при различных дозах внесения в почву сапонитсодержащих материалов [22]

Кроме того, в ряде исследований рассматривалось влияние сапонита на продуктивность однолетних трав. В частности, изучено действие водной суспензии сапонита на дерново-слабоподзолистых супесчаных окультуренных почвах (табл. 6), что подтверждает потенциал его использования в качестве мелиоранта [22].

Таблица 6. Средние значения качественных показателей однолетних трав при внесении сапонита

Доза сапонита, т/га	Сухое вещество, %	Сырая зола, %	Сырой протеин, %	Растворимые углеводы (сахар), %	Легко-гидролизуемые углеводы (крахмал), %	Сырая клетчатка, %	Сырой жир, %
Контроль	29,33	13,18	15,05	1,23	2,95	14,05	1,71
3,6	29,48	15,23	15,43	1,43	2,93	15,48	4,06
7,3	32,75	13,85	16,98	1,28	3,55	16,35	3,70
9,7	25,98	12,30	14,63	1,53	3,00	16,00	3,78
12	24,60	12,40	16,55	1,55	2,93	16,23	1,34

На основании предоставленных данных можно сделать следующие выводы о применении сапонита в различных сферах, включая кормопроизводство и фармакологию.

Роль сапонита в кормовых добавках

Биологическое влияние: сапонитсодержащие добавки улучшают обменные процессы, иммунитет, скорость роста и мясную продуктивность птицы за счёт сорбции токсинов (микотоксинов, бактериальных клеток, канцерогенов).

Экономическая эффективность: технологии с использованием минеральных добавок, включая сапонит, экономически обоснованы и могут повышать рентабельность производства кормов.

Применение сапонита в фармакологии в качестве вспомогательного вещества

Сапонит входит в состав таблеток и капсул как смазывающий агент (аналогично стеарату магния).

Может использоваться в качестве наполнителя или разрыхлителя.

Участвует в создании оболочек для лекарственных форм.

Эфферентная терапия

Благодаря слоистой структуре и высокой сорбционной способности сапонит связывает и выводит токсины, метаболиты и патогены из организма (адсорбция, ионный обмен).

Потенциально применим в детоксикационных препаратах и энтеросорбентах.

Перспективы использования сапонитсодержащих материалов в ветеринарии и животноводстве:

улучшение качества кормов,
профилактика микотоксикозов,
повышение продуктивности.

Перспективы использования сапонитсодержащих материалов в медицине:

разработка новых лекарственных форм с улучшенными технологическими свойствами;

создание препаратов для детоксикации (например, при отравлениях, инфекциях).

Таким образом, сапонит является многофункциональным минералом с доказанной эффективностью в животноводстве и перспективным применением в фармацевтике. Дальнейшие исследования могут расширить спектр его использования, включая нано- и биомедицинские технологии.

ВЫВОДЫ

Комплексное применение сапонитовой глины способствует значительному снижению эксплуатационных затрат на строительство и содержание хвостохранилищ, а также минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду в зоне производственной деятельности.

В рамках данного обзорного исследования рассмотрены четыре ключевых направления использования сапонитов. Данное природное сырье, относящееся к группе смектитов, обладает значительным потенциалом благодаря таким характеристикам, как экологическая безопасность и богатый минеральный состав. Универсальность сапонитов открывает широкие перспективы их применения в различных отраслях:

медицине – в качестве основы для создания лекарственных препаратов эффективного действия;

ветеринарии – как минеральной добавки к кормам сельскохозяйственных животных;

сельском хозяйстве;
строительной индустрии;
охране окружающей среды.

Сапонит как минерал превосходит другие глинистые компоненты по ряду параметров, включая широту применения, доступность сырьевой базы и экономическую эффективность. Наиболее ярко это подтверждается результатами исследований, посвященных использованию сапонита в качестве модифицирующей добавки к буровым растворам, что отражено в патентах на соответствующие технологии.

Глинистая суспензия, являющаяся побочным продуктом алмазообогатительных фабрик, может быть трансформирована в функциональный компонент строительных материалов, повышающий прочностные характеристики цементных композитов. Кроме того, сапонит демонстрирует высокую эффективность в качестве сорбента, что позволяет применять его как в фармацевтике (благодаря уникальным адсорбционным свойствам), так и в производстве кормовых добавок.

Рециклинг сапонита, обусловленный его особыми физико-химическими свойствами, способствует снижению техногенной нагрузки на предприятие и минимизации риска возникновения чрезвычайных ситуаций за счет сокращения площади хвостохранилищ при внедрении инновационных технологий переработки данного материала.

Таким образом, сапонит представляет собой универсальный минерал, который после извлечения из оборотного водоснабжения (например, методом коагуляционного сгущения) находит применение в различных отраслях промышленности. Использование сапонитсодержащих материалов не только способствует снижению экологической нагрузки, но и обеспечивает экономическую выгоду, что делает его перспективным сырьевым ресурсом.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FSRW-2024-0005).

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.И., Зубкова О.С., Полянский А.С. Усовершенствование технологии обогащения сапонитовой руды в процессе добычи алмазов // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2020. № 1. С. 74–80.
2. Minenko V.G. Adsorption properties of modified saponite in removal of heavy metals from process water // *Journal of Mining Science*. 2021. V. 57. № 2. P. 298–306.
3. Зубкова О.С., Пягай И.Н., Панкратьева К.А., Торопчина М.А. Разработка состава и исследование свойств сорбента на основе сапонита // *Записки Горного института*. 2023. Т. 259. С. 21–29.
4. Кошелев А.В., Веденеева Н.В., Заматырина В.А., Тихомирова Е.И., Скиданов Е.В. Разработка технологии получения сорбентов на основе бентонитовых глин для систем очистки воды // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2018. № 2 (74). С. 32–39.
5. Босак В.Н., Стрельцова Г.Д., Кузьменкова О.Ф., Сачивко Т.В. Влияние сапонитсодержащих базальтовых туфов на продуктивность сельскохозяйственных культур // *Земледелие и растениеводство*. 2022. № 5. С. 6–9.

6. Вешнякова Л.А., Айзенштадт А.М., Фролова М.А. Оценка поверхностной активности высокодисперсного сырья для композиционных строительных материалов // *Физика и химия обработки материалов*. 2015. № 2. С. 68–72.
7. Георгиева Э.Ю., Зубкова О.С., Торопчина М.А. Использование сапонитового шлама месторождения имени М.В. Ломоносова для приготовления бурового раствора // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2021. № 3. С. 79–84.
8. Prasai T.P., Walsh K.B., Bhattacharai S.P., Midmore D.J., Van Thi T. H., Moore R.J., Stanley D. Biochar, bentonite and zeolite supplemented feeding of layer chickens alters intestinal microbiota and reduces campylobacter load // *PLoS one*. 2016. V. 11. № 4. P. 0154061.
9. Цветкова А.М. Эффективность использования сорбентов в кормлении молодняка кроликов: дис. ... канд. с/х наук. Пос. Родники, 2013. 130 с.
10. Федеральная целевая программа «Ликвидация накопленного экологического ущерба» на 2014–2025 годы. URL: <https://минприроды.рф> (дата обращения: 03.03.2025).
11. Болтыров В.Б., Стороженко Л.А., Сапсай М.А. Накопленный экологический вред территорий размещения горнoprомышленных отходов прошлых лет // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021. № 5–2. С. 202–217.
12. Зубкова О.С., Алексеев А.И., Сизяков В.М., Полянский А.С. Исследование влияния сернокислых солей на процесс отстаивания глинистой суспензии // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2022. Т. 65. Вып. 1. С. 44–49.
13. Аверкина Е.В., Шакирова Э.В., Бутакова Л.А. Влияние реагентов-флокулянтов на параметры глинистых суспензий // *Науки о Земле и недропользование*. 2020. Т. 43. № 2. С. 230–241.
14. Панкратьева К.А., Зубкова О.С. Комплексная переработка сапонитовых руд Ломоносовского месторождения алмазов // *Успехи в химии и химической технологии*. 2021. Т. 35. № 8. С. 129–131.
15. Разработка технологии очистки воды для обогатительной фабрики Ломоносовского ГОКа ПАО «Севералмаз» от взвешенных веществ с применением кальций-алюмосиликатного реагента: отчет о научно-исследовательской работе № 153-03-19 СА от 15.03.2019. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2019. 61 с. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1754120527&tId=ru&lang=ru&name=alekseevai-alrosa.pdf&text=15.%20Санкт-Петербургский%20горный%20университет> (дата обращения: 03.04.2025).
16. Ланг И.В., Петрова Т.А. Обзор существующих направлений и методов утилизации отходов обогащения алмазоносной руды // *Шаг в будущее: теоретические и прикладные исследования современной науки: Материалы XVI молодежной Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных*. СПб.: CreateSpace, 2018. С. 36–40.
17. Тельминов И.В., Невзоров А.Л., Заручевых И.Ю., Корзова М.А. Искусственные почвогрунты из отходов обогащения кимберлитовой руды // *Вестник МГСУ*. 2012. № 1. С. 128–132.
18. Тесленок С.А., Шперль Д.А. Загрязнение окружающей среды при открытой добыче полезных ископаемых // *Огарев-Online*. 2023. № 4 (189). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zagryaznenie-okrughayuschey-sredy-pri-otkrytoy-dobyche-poleznyh-iskopаемyh> (дата обращения: 02.08.2025).
19. Севералмаз. Деятельность предприятия. URL: <http://www.severalmaz.ru/o-kompanii/deyatelnost/> (дата обращения: 03.04.2025).

20. Севералмаз. Карта производственного процесса. URL: <https://severalmaz.ru/proizvodstvo/protsess-proizvodstva/map/severalmaz.html> (дата обращения: 10.03.2025).
21. Облицов А.Ю. Утилизация отходов обогащения алмазосодержащей породы с учетом специфики месторождения им М.В. Ломоносова // *Записки Горного института*. 2011. Т. 189. С. 141–145.
22. Романов Е.М., Наквасина Е.Н., Косарева Е.Н. Применение водной суспензии сапонита на дерново-слабоподзолистой супесчаной окультуренной почве в качестве мелиоранта // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. 2020. № 8 (161). С. 9–17.
23. Алексеев А.И., Зубкова О.С., Полянский А.С. Очистка карьерных вод ПАО «Севералмаз» от дисперсных частиц глинистого минерала сапонита методом сгущения // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*. 2020. № 55 (81). С. 22–27.
24. Умиров Ф.Э., Музафаров А.М., Пирназаров Ф.Г., Умиров У.Ф. Изучение химического состава и свойств минерала сапонита // *Горный вестник Узбекистана*. 2020. Т. 3 (82). С. 76–78.
25. Чантuria В.А., Двойченкова Г.П., Ковальчук О.Е. Поверхностные свойства алмазов метасоматически измененных кимберлитов и их модификация в условиях переработки минерального сырья // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2015. № 2. С. 137–148.
26. Карпенко Ф.С. Условия накопления сапонитсодержащих осадков и технология их сгущения в хвостохранилище месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова: дис. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2009. 155 с.
27. Патент РФ 2448052. *Способ сгущения сапонитовой суспензии* / Утин А.В. Заявл. 08.11.2010. Опубл. 20.04.2012. Бюл. № 11.
28. Патент РФ 2669272. *Способ сгущения сапонитовой суспензии* / Алексеев А.И., Конончук О.О., Зубкова О.С., Бричкин В.Н. Заявл. 15.01.2018. Опубл. 09.10.2018. Бюл. № 28.
29. Патент РФ 2780569 *Способ очистки оборотной воды горнодобывающей промышленности от сапонитсодержащего материала и песка* / Малыгина М.А., Айзенштадт А.М., Данилов В.Е., Пожилов М.А. Заявл. 19.11.2021. Опубл. 27.09.2022. Бюл. № 27.
30. Патент РФ 2490293. *Способ приготовления гидрофобного эмульсионного бурового раствора методом инверсии фаз для бурения пологих и горизонтальных скважин* / Нацепинская А.М., Попов С.Г., Некрасова И.Л., Гаршина О.В., Гребнева Ф.Н., Хвошин П.А., Окромелидзе Г.В., Ильясов С.Е. Заявл. 13.02.2012. Опубл. 20.08.2013. Бюл. № 23.
31. Базаров Г.Р., Абдурахимов С.А. Разработка технологии получения термо- и солестойких буровых растворов из полиминеральных композиций с использованием механо-химического способа их диспергирования // *Нефтегазовое дело*. 2023. Т. 21. № 3. С. 11–16.

32. Базаров Г.Р. Рациональное использование отработанных жирных глин при получении буровых растворов // *Universum: технические науки*. Электрон. научн. журн. 2019. № 11 (68). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/8133> (дата обращения: 02.08.2025).
33. Кудайқулова Г.А. Буровые глинистые растворы: учебное пособие. Алматы: КазНТУ, 2003. 137 с.
34. Pashkevich M.A., Alekseenko A.V. Reutilization prospects of diamond clay tailings at the Lomonosov mine, Northwestern Russia // *Minerals*. 2020. V. 10. № 6. P. 517.
35. Мязин В.П., Попова Г.Ю., Татауров С.Б. Использование реагентов-кольматантов для снижения фильтрационных потерь воды в системах оборотного водоснабжения промывочных установок // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 1996. № 6. С. 46–48.
36. Невзоров А.Л., Саенко Ю.В., Ширанов А.М. Модификация песка суспензией сапонитовой глины – одним из отходов алмазодобывающей промышленности // *Construction and Geotechnics*. 2022. Т. 13. № 4. С. 103–115.
37. Дмитриев А.Ю. Основы технологии бурения скважин: учебное пособие. Томск: ТПУ, 2008. 216 с.
38. Гасумов Р.Р., Димитриади Ю.К., Лукьянов В.Т., Федоренко В.В. Совершенствование составов буровых растворов для проводки скважин в сложных термобарических условиях // *Наука. Инновации. Технологии*. 2017. № 4. С. 137–156.
39. Патент РФ 2698389. Высокоингибированный безглинистый эмульсионный буровой раствор / Грисюк П.В. Заявл. 26.10.2018. Опубл. 26.08.2019. Бюл. № 24.
40. Ширякина Ю.М., Китаева Н.С., Афанасьева Е.А., Бутузов А.В. Амфи菲尔ные соединения и гидрофобизация (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 7 (113). С. 99–115.
41. Журов М.М. Технология получения и исследование свойств микродисперсного гидрофобного адсорбента на основе бентонитовой глины для ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларусь*. 2017. Т. 1. № 2. С. 203–214.
42. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 года № 1523-р. URL: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006150_001 (дата обращения: 25.05.2025).
43. Фролова М.А., Морозова М.В., Айзенштадт А.М., Тутыгин А.С. Алюмосиликатное вяжущее на основе сапонитсодержащих отходов алмазодобывающей промышленности // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 68–70.
44. Морозова М.В., Айзенштадт А.М., Махова Т.А. Использование сапонитсодержащих отходов в качестве компонента сухой строительной смеси для мелкозернистых бетонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками // *Academia. Архитектура и строительство*. 2015. № 4. С. 137–141.
45. Еленова А.А., Кривобородов Ю.Р. Синтез расширяющей добавки для устранения усадки цементного камня // *Вестник МГСУ*. 2017. № 3. С. 326–333.
46. Морозова М.В. Эксплуатационные характеристики бетонов, модифицированных высокодисперсным сапонитсодержащим материалом // *Вестник СибАДИ*. 2018. Т. 15. № 2 (60). С. 269–275.
47. Калинин И.В., Богатыренко В.А., Нестеровский В.А. Использование кислотно-активированных сапонитов в качестве природных сорбентов // *Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. Т. 8. № 2. С. 134–139.

48. Стрельцова Г.Д., Кузьменкова О.Ф., Кольненков В.П., Бабец М.А., Босак В.Н., Баранцева С.Е., Лугин В.Г. Сапонитсодержащие базальтовые туфы – перспективное силикатное и агрохимическое сырье. *Проблемы рационального использования природных ресурсов и устойчивое развитие Полесья: Сборник докладов Международной научной конференции: в 2 т.* Минск: Беларуская навука, 2016. Т. 1. С. 565–569.

49. Новоселов А.Г., Дреер Ю.И., Новоселова И.Н., Васина Ю.А. Эффективность использования техногенного продукта электролитического производства алюминия в качестве минерализатора при обжиге портландцементного клинкера // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2022. № 5. С. 71–80.

50. Федюк Р.С., Мочалов А.В., Лесовик В.С. Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) // *Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. 2018. № 4 (37). С. 85–99.

Для цитирования: Данилов А.С., Кремчев Э.А., Магдеева Н.М. Перспективы использования сапонитсодержащих отходов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 45–63.

PROSPECTS FOR THE USE OF SAPONITE-CONTAINING WASTE

A.S. DANILOV¹, Cand. Sc., E.A. KREMCHEEV², Dr. Sc., N.M. MAGDEEVA¹, Stud.

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
2, 21 liniya V.O., 199106, St. Petersburg, e-mail: Danilov_AS@pers.spmi.ru
²National research university "High school of economics",
16, Soyuza Pechatnikov st., 190121, St. Petersburg, e-mail: kremcheev@mail.ru

This article describes modern technologies for processing saponite-containing waste, which is widely used for wastewater treatment, construction, and agriculture. The composition and main properties of this waste are discussed. Various methods for thickening saponite-containing suspensions are analyzed, highlighting their advantages and disadvantages. The most promising areas for further study of saponite-containing waste and its processing technologies are presented.

Keywords: saponite-containing ore, saponite, clay suspension, sorption properties, drilling mud, suspended particles, sorbent, ameliorant, fertilizer, additive.

Поступила в редакцию/received: 01.08.2025; после рецензирования/revised: 11.08.2025;
принята/accepted: 11.08.2025

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 004.738(075.8)

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-64-71

ЭФФЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ТРАНСПОРТЕ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

А.Ю. КЛЮШИН, канд. техн. наук

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

© Клюшин А.Ю., 2025

Статья посвящена актуальным для крупных городов проблемам автомобильного транспорта, решение которых требует дальнейшего развития теоретической и практической базы внедрения гибридной интеллектуальной транспортной системы для повышения безопасности дорожного движения. Показано место интеллектуальной транспортной системы в управлении, описана общая схема ее работы. Обоснована необходимость перехода на адаптивные алгоритмы работы с транспортными потоками и применения гибридных интеллектуальных систем.

Ключевые слова: транспорт, безопасность дорожного движения, гибридная интеллектуальная система, адаптивное управление.

ВВЕДЕНИЕ

Адаптивный подход к повышению эффективности гибридной интеллектуальной транспортной системы предполагает гибкое управление дорожным движением на основе изменений условий транспортного потока. Наиболее важные проблемы, обостряющиеся по мере роста уровня автомобилизации, связаны с обеспечением безопасности дорожного движения.

Транспортная система (ТС) – система, включающая различные элементы для перемещения (доставки) людей и грузов и состоящая из инфраструктуры, предприятий, средств и управления [1].

Процесс принятия решений в любой сфере, в том числе и на транспорте, основан на переработке больших объемов информации. Информационная система должна обеспечивать возможность получения необходимой информации конкретным лицом в нужное время. Российская транспортная система характеризуется большой зависимостью от информационных технологий, которые построены на основе информационных хранилищ и интеллектуальной обработки данных.

Интеллектуальная информационная система (ИИС) – комплекс программных, лингвистических и логико-математических средств для реализации основной задачи – осуществления поддержки деятельности человека и поиска информации в режиме продвинутого диалога на естественном языке [2].

В современной цифровой экономике широкое распространение получили гибридные интеллектуальные системы (ГиИС). Они строятся на объединении потенциала экспертных систем и нейронных сетей. Это системы, в которых для решения задачи используется более одного метода имитации интеллектуальной деятельности человека [3]. Таким образом, ГиИС – это совокупность аналитических моделей, экспертных систем, искусственных нейронных сетей, нечетких систем, генетических алгоритмов, имитационных статистических моделей.

Междисциплинарное направление «гибридные интеллектуальные системы» объединяет ученых и специалистов, исследующих применимость к решению задач управления и проектирования не одного, а нескольких методов, как правило, из различных классов. В 2007 году была выдвинута проблемно-инструментальная методология разработки ГиИС. Она представляла собой расширение проблемно-структурного подхода, предназначенногодля ситуаций, когда отсутствуют подходящие методы для решения компонентов сложной задачи.

При большом количестве разработок по цифровизации экономики основные проблемы повышения эффективности транспортных систем на базе цифровых технологий далеки от решения. Например, важно отметить, что именно безопасность дорожного движения (БДД) для ТС остается одной из ключевых глобальных проблем XXI века. Согласно данным ВОЗ, ежегодно в мире в ДТП погибает около 1,3 млн чел., а экономические потери достигают 3 % от ВВП стран. В России, несмотря на реализацию федеральных программ, уровень аварийности остается высоким: в 2024 году зафиксировано свыше 130 тыс. ДТП, в которых погибли более 15 тыс. человек. Такие потери диктуют необходимость поиска системных решений, способных радикально улучшить ситуацию [4].

Актуальность темы обусловлена:

социальным запросом на снижение аварийности;
технологической готовностью к системной интеграции;
экономической целесообразностью инвестиций в интеллектуальные транспортные системы (ИТС);
научной потребностью в разработке адаптированных моделей.

Проведение данного исследования соответствует стратегии безопасности дорожного движения РФ до 2030 года [5, 6]. Решение проблемы требует математического обеспечения в виде моделей, методов и комплексов программ для анализа и предотвращения событий на основе системного подхода.

Объектом исследования является региональная ИТС (физическая и информационная инфраструктура) с соответствием современным трендам по ориентации на технологии Industry 4.0 (ПоТ, AI, BigData).

В российской транспортной сфере активно внедряются цифровые решения. Идеи Индустрии 4.0 и промышленного интернета вещей (ПоТ) превращаются из модных направлений в важные инструменты для увеличения продуктивности, адаптивности и гибкости. Главным элементом трансформации является сбор надежных данных о физических процессах в текущем времени. В этом контексте современные системы мониторинга (например, беспроводные сети с сенсорами) играют определяющую роль в повышении БДД.

Целью работы является рассмотрение возможностей и эффектов от применения ГиИС на транспорте для повышения БДД с учетом региональных особенностей.

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ТРАНСПОРТЕ

Интеллектуальная техника систем автоматизированного управления дорожным движением (АСУДД) представляет собой адаптивные системы управления движением в городах и регионах. Эти системы имеют различные возможности, такие как наблюдение за состоянием дорожной сети, обобщение полученных данных, анализ текущей ситуации, на основе чего осуществляется управление транспортными потоками. Важным аспектом является информирование всех участников дорожного движения о состоянии системы посредством дорожных знаков с автоматически изменяемой информацией, специальных динамических информационных табло, расписания движения общественного транспорта и других сервисов. Кроме того, АСУДД могут предоставлять через «горячую линию» актуальную информацию о местах проведения массовых мероприятий, перекрытиях или ремонте дорог, а также предлагать схемы объезда.

Системы АСУДД, основанные на компьютеризированных интеллектуальных автоматических системах, получили широкое распространение во всем мире как ИТС. Для обеспечения функциональности в ИТС необходимо наличие обратной связи, позволяющей автоматическую передачу оперативных данных о работе объектов ТС в блок управления, а также автоматическое (или с минимальным участием оператора) формирование управляющих воздействий на объекты ТС в режиме реального времени.

На рис. 1. показана укрупненная схема ИТС в управлении транспортным комплексом [7].



Рис. 1. Место ИТС в управлении транспортным комплексом

Ключевые достоинства ИТС заключаются в увеличении эффективности дорожного движения, что приводит к уменьшению числа ДТП. Это достигается благодаря информированию каждого водителя о наиболее подходящих маршрутах. Поэтому, внедрив динамические системы навигации, предлагающие оптимальный путь следования, можно учитывать индивидуальные предпочтения каждого пользователя, не противореча общим задачам организации дорожного движения. Данное направление активно используется во многих странах мира, включая и нашу страну, где уже имеются успешные примеры реализации и дальнейшего совершенствования этих технологий [8].

Целесообразность внедрения ИТС определяется еще и тем, что в их системной информационной среде руководители транспорта и административные органы впервые приобретают возможность получать оперативные и объективные данные о работе как пассажирского, так и других видов транспорта, а также принципиально новую возможность оперативно контролировать и, следовательно, управлять безопасностью работы ТС крупных городов.

Построение ИТС является закономерным этапом удовлетворения современных высоких требований экономики и населения к транспортному обслуживанию. Это происходит и при использовании мониторинговых систем – многофункциональных интеллектуальных систем, позволяющих в реальном времени контролировать местонахождение автомобиля с помощью встроенной системы спутниковой навигации GPS/ГЛОНАСС, состояние его ключевых узлов и агрегатов, автоматически реагировать на заданные события, получать команды и отправлять сообщения с помощью встроенного GSM-модема. Общая схема работы ИТС представлена на рис. 2.

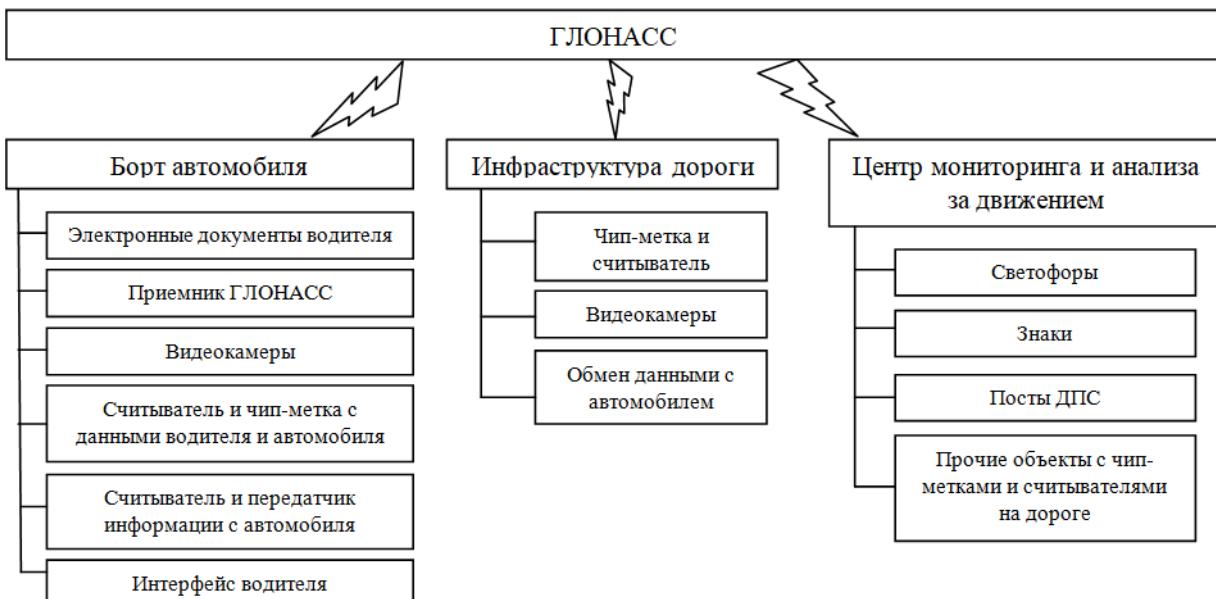


Рис. 2. Общая схема работы ИТС

Таким образом, ИТС – это результат интеграции информационных и коммуникационных технологий и средств автоматизации с транспортной инфраструктурой, транспортными средствами и их пользователями для повышения безопасности и оптимизации дорожного движения.

Контроль работы ТС – это комплекс, включающий в себя две подсистемы: управление транспортными потоками и управление транспортными средствами.

Активный компонент ТС – это множество людей, которые обладают способностью адаптироваться к быстро изменяющимся условиям и поведение которых направлено на достижение собственных целей. Присутствие человеческого фактора как активного элемента системы является причиной формирования устойчивых (стационарных) режимов функционирования транспортных систем, так как любое внешнее воздействие на индивидуальный объект компенсируется решением активного субъекта (в частности, водителя). Поэтому применение ГиИС как совокупности моделей, алгоритмов, информационного обеспечения необходимо для повышения БДД и анализа ее эффективности.

Специалисты ГИБДД и транспортные планировщики, как правило, используют следующий процесс анализа эффективности БДД:

1. Теоретическая база + системный анализ.
2. Моделирование ERD/DFD + математические методы.
3. Статистический анализ + экспериментальная подготовка.
4. Оценка эффективности.

DFD (диаграмма потока данных) и ERD (диаграмма взаимосвязи сущностей) – это два типа диаграмм, которые используются для описания потока данных и информации внутри системы: DFD – для моделирования потока данных между процессами, хранилищами данных и внешними объектами; ERD – для моделирования структуры базы данных, а также взаимосвязей между сущностями, составляющими эту структуру.

Обоснование выбора методов:

- 1) комплексность – сочетание теоретических и прикладных подходов;
- 2) верифицируемость – все методы позволяют получить количественные результаты;
- 3) практическая направленность – ориентация на внедрение в реальные ТС.

В данном процессе используются:

комбинация классических транспортных исследований с методами DataScience;

адаптация методов машинного обучения для задач БДД;

интеграция подходов из смежных областей, включая градостроительство, телекоммуникации и т. д.

ОРГАНИЗАЦИОННО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Отечественные исследования демонстрируют значительный прогресс в области адаптивного управления транспортными потоками. Это приводит к повышению качества управления транспортным процессом и дорожной инфраструктуры за счет эффективного управления данными. Основными пробледами здесь являются недостаточная цифровизация, слабая предиктивная аналитика и региональная несбалансированность [9].

Схема текущего состояния ИТС в регионе представлена на рис. 3.

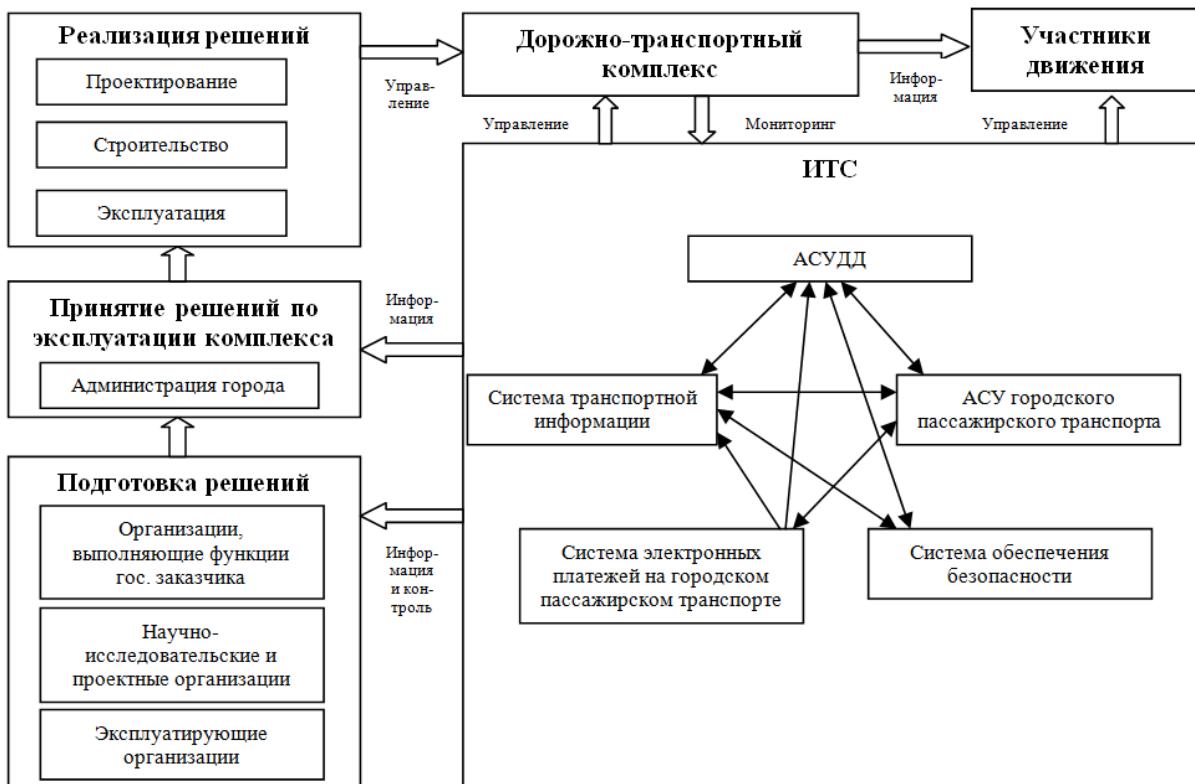


Рис. 3. Схема текущего состояния ИТС в регионе

Проанализируем текущее состояние ИТС в Тверской области на примере внедрения цифровой платформы «Датапакс» [10].

Тверская область – один из pilotных регионов по внедрению цифровой платформы «Датапакс», рекомендованной Госсоветом РФ для масштабирования в других субъектах.

1. Ключевые достижения.

Снижение аварийности: после внедрения системы на 67 % сократилось количество ДТП с участием общественного транспорта.

Оптимизация маршрутов: среднее время поездок уменьшилось на 10 % за счет анализа пассажиропотока и корректировки расписаний.

Безналичная оплата: 80 % поездок оплачиваются безналично, в том числе с помощью банковских карт.

2. Проблемы.

Охват системы пока ограничен некоторыми наиболее крупными городами, такими как Тверь, Ржев, Кимры, сельские районы подключены слабо.

Отсутствие специалистов по эксплуатации ИТС и транспортному планированию – ключевая проблема, характерная для регионов России. В Тверской области это усугубляется отсутствием крупных IT-центров, способных готовить профильные кадры.

Поддержка ИТС требует значительных бюджетных вложений. Например, обслуживание систем видеоаналитики и адаптивных светофоров в Твери может стать финансовой нагрузкой для региона, особенно с учетом необходимости регулярного обновления программного обеспечения и замены оборудования.

Используется устаревшее оборудование без поддержки адаптивного управления.

На большинстве перекрестков отсутствуют интеллектуальные датчики транспорта.

Ограничены возможности обработки данных в реальном времени.

3. Мониторинг и аналитика.

Имитационное моделирование: в 2021 году разработаны модели пассажиропотоков для некоторых станций и маршрутов в нескольких городах области (Кимрах, Старице и др.).

Данные для оптимизации: используется информация о движении транспорта, оплате проезда и авариях для корректировки маршрутной сети.

Ограничения связаны с нехваткой стационарных датчиков на дорогах, что снижает точность данных в реальном времени.

4. Сравнение с другими регионами.

Тверская область отстает по уровню автоматизации (в столице – 2,6 тыс. адаптивных светофоров и 3,7 тыс. детекторов), но все более активно внедряет технологии искусственного интеллекта для прогнозирования ДТП.

5. Рекомендации по развитию.

Расширение покрытия «Датапакс» на малые города и сельские маршруты.

Интеграция с ИТС Москвы для согласованного управления транзитными потоками (например, по трассе М-10).

Внедрение предиктивных систем на основе данных БПЛА и камер для контроля аварийных участков.

6. Вывод.

Тверская область демонстрирует прогресс в цифровизации транспорта, но требует дополнительных инвестиций и интеграции с федеральными проектами для достижения уровня ведущих регионов.

Ключевые проблемы ИТС в Тверской области с рекомендациями

Приоритет региональной интеграции: создание единой платформы для сбора данных по всем муниципалитетам.

Инвестиции в импортозамещение.

Обучение кадров: партнерство с вузами для подготовки специалистов по ИТС.

Устаревшая техническая база: до 40 % светофорного оборудования в Твери требует модернизации, многие объекты работают на аппаратуре 2000-х годов выпуска.

Нехватка датчиков транспорта.

Большинство перекрестков работают по жестким временным программам без адаптивного управления.

Дефицит финансирования и длительные процедуры закупок.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенный анализ существующих АСУДД в Тверской области позволил на основании выявленных недостатков сформулировать следующие задачи дальнейшего исследования по повышению БДД:

1. Разработать методику комплексной оценки эффективности АСУДД с учетом региональных особенностей Тверской области.

2. Создать алгоритм адаптивного управления транспортными потоками на основе ГИС, обеспечивающий динамическое регулирование светофорных циклов, прогнозирование транспортной нагрузки, оптимизацию пропускной способности перекрестков с учетом региональных особенностей.

3. Предложить экономическую модель модернизации АСУДД, включающую расчет требуемых инвестиций, оценку экономической эффективности, механизмы привлечения финансирования.

4. Разработать организационную схему внедрения интеллектуальной системы управления, предусматривающую создание единого инновационного центра управления, подготовку квалифицированного персонала, поэтапный переход на новые технологии.

Исходя из решения поставленных задач предполагается получить следующие результаты:

1. Научно обоснованные рекомендации по модернизации АСУДД в Тверской области.

2. Программно-аппаратный комплекс адаптивного управления, позволяющий снизить задержки транспорта на 20–25 %, увеличить пропускную способность магистралей на 15–20 %, сократить количество ДТП на регулируемых перекрестках на 15 %.

3. Экономическое обоснование: срок окупаемости проекта от внедрения, эффект от снижения транспортных издержек, социально-экономическая выгода от внедрения с учетом региональных особенностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматизированная система управления дорожным движением Тверской области требует комплексной модернизации с акцентом на интеграцию, автоматизацию и внедрение современных технологий управления трафиком на основе ГиИС на транспорте.

Результаты работы будут иметь практическую ценность для органов управления транспортом, проектировщиков дорожной инфраструктуры, разработчиков интеллектуальных систем.

Таким образом, долгосрочная цель повышения БДД в ТС региона направлена на внедрение моделей и методов обеспечения БДД, интегрированных в ТС будущего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галабурда В.Г., Персианов В.А., Тимошин А.А. Единая транспортная система: учебник. М.: Транспорт, 1996. 295 с.

2. Колесников А.В., Кириков И.А. Методология и технология решения сложных задач методами функциональных гибридных интеллектуальных систем. М.: ИПИ РАН, 2007. 387 с.

3. Клачек П.М., Бабкин А.В., Либерман И.В. Функциональная гибридная интеллектуальная система принятия решений для трудноформализуемых производственно-экономических задач в цифровой экономике // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2019. Т. 12. № 1. С. 21–32.

4. Щёголев М.П., Клюшин А.Ю. Основы совершенствования системы управления безопасностью дорожного движения // Транспорт. Экономика. Социальная сфера (Актуальные проблемы и их решения): Сборник статей XI Международной научно-практической конференции. Пенза: Пензенский ГАУ, 2024. С. 313–316.

5. Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации транспортной отрасли России до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 21 декабря 2021 г. № 3744-р. URL: <https://consultant.ru> (дата обращения: 15.07.2025).

6. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. URL: <https://consultant.ru> (дата обращения: 15.07.2025).

7. Евстигнеев И.А. Основы создания интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях России. М.: Перо, 2021. 294 с.
8. Курганов В.М. Логистические транспортные потоки: учебно-практическое пособие. М.: Дашков и К°, 2003. 249 с.
9. Миротин Л.Б., Покровский А.К., Некрасов А.Г. Управление социально-техническими системами: учебное пособие. М.: Академия, 2014. 190 с.
10. Отчет НИИАТ «Пилотное внедрение ИТС в г. Тверь». М.: НИИАТ, 2022. 103 с.

Для цитирования: Ключин А.Ю. Эффекты применения гибридной интеллектуальной системы на транспорте для повышения безопасности дорожного движения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 64–72.

EFFECTS OF USING A HYBRID INTELLIGENT SYSTEM IN TRANSPORT TO IMPROVE ROAD SAFETY

A.Yu. KLYUSHIN, Cand. Sc.

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

The article is devoted to the problems of road transport that are relevant for large cities, and their solution requires further development of the theoretical and practical basis for the implementation of a hybrid intelligent transport system to improve road safety. The article shows the place of an intelligent transport system in management and describes its general scheme of operation. The article substantiates the need to switch to adaptive algorithms for working with traffic flows and the use of hybrid intelligent systems.

Keywords: transport, road safety, hybrid intelligent system, adaptive management.

Поступила в редакцию/received: 01.08.2025; после рецензирования/revised: 13.08.2025;
принята/accepted: 13.08.2025

УДК 004.738(075.8)

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-72-82

ИНСТРУМЕНТАРИЙ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

А.Ю. КЛЮШИН, канд. техн. наук

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

© Ключин А.Ю., 2025

Статья посвящена совокупности средств, применяемых для осуществления процесса управления безопасностью дорожного движения в транспортных системах. Это требует прежде всего построения реалистичных моделей транспортных потоков,

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (28), 2025*

что приведет к снижению интенсивности движения и тем самым повысит эффективность гибридной интеллектуальной транспортной системы. Предложено совершенствование методов прикладных исследований на основе гибридного подхода к адаптивному управлению транспортными потоками.

Ключевые слова: транспортная система, автоматизированная система управления дорожным движением, безопасность дорожного движения, адаптивное управление, гибридная интеллектуальная система.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время не только специалисты в области организации движения, дорожного строительства, инженерной подготовки городских территорий, но и ученые – разработчики интеллектуальных транспортных систем (ИТС) являются обязательными участниками формирования транспортных систем (ТС) на всех стадиях этого процесса [1–4]. Поэтому результаты их исследований должны применяться при модернизации систем управления дорожным движением (АСУДД) и в дальнейшем использоваться в нормативно-методических документах по безопасности дорожного движения (БДД).

Современные методы обеспечения БДД основаны на ручном управлении транспортными потоками, разрозненных технических средствах, таких как камеры, датчики, а также на реактивных мерах, включая штрафы и ремонт после аварий. Они демонстрируют низкую эффективность в условиях роста числа транспортных средств (за 10 лет парк автомобилей в РФ вырос на 40 %). Это делает необходимым создание адаптивных систем управления, способных обрабатывать данные в реальном времени.

Несмотря на активное применение ИТС, остаются нерешенными вопросы, связанные с отсутствием единых стандартов интеграции подсистем (светофоров, навигации, экстренных служб), недостаточной проработкой экономических моделей внедрения, слабой адаптацией зарубежных решений к российским условиям, включая климат и инфраструктуру [5–7].

Цель работы заключается в рассмотрении возможностей перехода к гибридному подходу по модели, основанной на адаптивном управлении транспортными потоками всех элементов ИТС.

ОБЗОР И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В УПРАВЛЕНИИ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

На современном этапе развития ТС моделирование транспортного потока становится ключевым инструментом для оценки и оптимизации инфраструктуры (рис. 1). Особенно это актуально для информационного уровня.

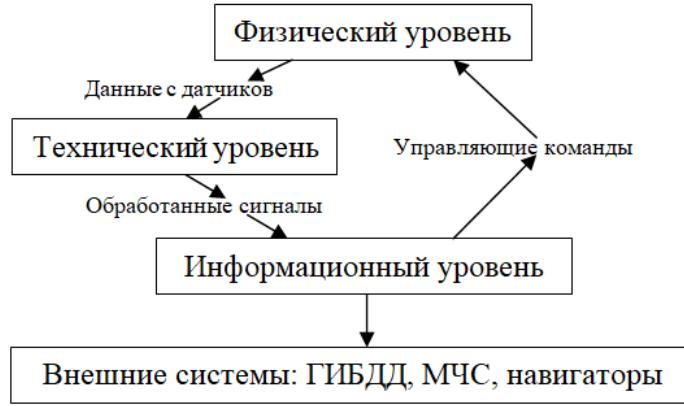


Рис. 1. Уровни применения информационных технологий в управлении БДД

С развитием транспортной инфраструктуры и увеличением потока транспортных средств возрастает потребность в точных моделях и методах для анализа текущей ситуации и управления движением. Сюда входят:

1. Методы прогнозирования транспортных потоков.

1.1. Модель временных рядов (ARIMA) [8]. Рассмотрим ее при помощи формулы (1), которая используется для краткосрочного прогнозирования интенсивности движения:

$$(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i L^i)(1 - L)^d X_t = (1 + \sum_{i=1}^q \theta_i L^i)\epsilon_t, \quad (1)$$

где p – порядок (количество временных лагов) авторегрессионной модели X_t ;

d – степень дифференцирования (количество раз, когда из данных вычитались прошлые значения);

q – порядок модели скользящего среднего;

X_t – временной ряд (действительные числа);

t – целочисленный индекс;

L – оператор задержки (лага);

ϵ_t – белый шум (ошибочные утверждения);

θ_i – параметры модели (параметры части, состоящей из скользящих средних);

ϕ_i – параметры авторегрессионной части модели, например интенсивности движения – это количество транспортных средств, проходящих через поперечное сечение дороги в определенном направлении или направлениях в единицу времени (за час, сутки, год).

2. Методы оптимизации светофорного регулирования. Рассмотрим их, применив формулы (2)–(5).

2.1. Модель движения на перекрестке.

Критерий для адаптивного управления:

$$P_i = \frac{q_i}{1 - \frac{q_i}{s_i}} - \frac{q_j}{1 - \frac{q_j}{s_j}}, \quad (2)$$

где q_i – интенсивность на подходе i ;

s_i – пропускная способность.

Обоснование: учитывает неравномерность нагрузки на направления.

2.2. Алгоритм максимизации пропускной способности. Целевая функция

$$\max \sum_{i=1}^N \left(s_i \cdot \frac{g_i}{C} \right); \quad (3)$$

при ограничениях:

$$\sum g_i + L = C, \quad (4)$$

$$g_i^{min} \leq g_i \leq g_i^{max}, \quad (5)$$

где g_i – длительность фазы;

C – цикл светофора;

L – суммарное время потерянных тактов.

3. Методы машинного обучения. Рассмотрим их, применив формулы (6)–(13).

3.1. Градиентный бустинг (XGBoost) для классификации ДТП.

Целевая функция с регуляризацией

$$L(\theta) = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{k=1}^K \Omega(f_k), \quad (6)$$

где y_i, \hat{y}_i – истинные значения и предсказания модели;

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \|w\|^2, \quad (7)$$

где T – число листьев;

w – веса листьев;

γ, λ – параметры регуляризации.

Обоснование: устойчивость к переобучению при работе с неполными данными.

3.2. LSTM-сети для прогнозирования.

Уравнения ячейки: LSTM (LongShort-TermMemory) – тип рекуррентной нейронной сети (Recurrent Neural Networks, RNN), специально разработанный для работы с временными рядами. Уравнения ячейки включают:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \text{ (забывающий гейт);} \quad (8)$$

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \text{ (входной гейт);} \quad (9)$$

$$\tilde{C}_t = \tan h(W_C \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_C) \text{ (кандидат на обновление);} \quad (10)$$

$$C_t = f_t \circ C_{t-1} + i_t \circ \tilde{C}_t \text{ (обновление состояния);} \quad (11)$$

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \text{ (выходной гейт);} \quad (12)$$

$$h_t = o_t \circ \tan h(C_t) \text{ (выход ячейки)}, \quad (13)$$

где f_t – затвор забывания;

i_t – входной затвор;

W_i – матрицы весов;

x_t – входной временной шаг;

h_t – выходной сигнал;

b – веса (состояния);

$\tan h$ – функция активации в рекуррентной нейронной сети;

C_t – состояние ячейки;

\tilde{C}_t – внутреннее состояние ячейки;

o_t – выходной затвор.

Обоснование: учет долгосрочных временных зависимостей в данных датчиков.

Построим на основе методов имитационного моделирования микроскопическую модель в SUMO (The Simulation of Urban Mobility) по формулам (14) и (15).

Уравнение движения IDM (Identity Management). Модель описывает динамику ускорения отдельного транспортного средства:

$$\frac{dv}{dt} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v^0} \right)^{\delta} - \left(\frac{s^*}{s} \right)^2 \right], \quad (14)$$

где dv / dt – ускорение (температура изменения скорости от времени);

v – скорость движения транспортного средства;

v^0 – желаемая скорость транспортного средства, т. е. скорость, с которой оно перемещалось бы при свободном движении;

s^* – расстояние от бампера до следующего транспортного средства;

s – минимальный интервал до следующего транспортного средства, сохраняемый при остановке движения;

δ – показатель ускорения (обычно равен 4).

В формуле (14) желаемый дистанционный зазор s^* вычисляется как

$$s^* = s^0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}, \quad (15)$$

где Δv – разница в скорости (скорость сближения) с ближайшим транспортным средством;

T – минимально возможное время до прибытия следующего транспортного средства;

a – максимальное ускорение автомобиля;

b – целевая скорость замедления (комфортная скорость торможения), положительное число.

На основе данных методов целесообразно использовать гибридный подход, основанный на адаптивном управлении транспортными потоками всех элементов ИТС (LSTM + SUMO + XGBoost): комбинация ML-прогнозирования (Machine Learning) и физически точного моделирования (SUMO) дает преимущества перед чисто статистическими методами, так как позволяет учитывать не только данные датчиков, но и поведенческие факторы (например, реакцию водителей на изменения светофоров).

Усовершенствование № 1: динамическая калибровка LSTM в реальном времени.

Проблема: классические LSTM обучаются на исторических данных и не адаптируются к резким изменениям (авариям, погоде).

Решение: внедрение механизма обратной связи из SUMO в ML-модель.

Пример: если симуляция показывает погрешность >10 %, LSTM автоматически дообучается на новых данных.

Усовершенствование № 2: интеграция Explainable AI (XAI) для XGBoost.

Проблема: «черный ящик» градиентного бустинга затрудняет интерпретацию решений для центра управления дорожным движением (ЦУДД).

Решение: использование SHAP-значений (Shapley Additive Explanations) для объяснения того, какие факторы влияют на риск ДТП (например, гололед + ночные времена = 65 % вклада).

Новизна: впервые применяется для адаптивного управления светофорами.

Усовершенствование № 3: экономическая оптимизация в SUMO.

Проблема: традиционные методы не минимизируют совокупные затраты (топливо + время + ущерб от ДТП).

Решение: введение целевой функции в SUMO с калибровкой коэффициентов α – время_поеzdki, β – топливо, γ – риск_ДТП.

Практическая значимость доработанного метода заключается в следующем.

1. Для ЦУДД: возможность предсказывать аварии за 15–30 мин с точностью до 89 %; объяснимые рекомендации для операторов.

2. Для экономики: снижение затрат на топливо (–12 %) и ликвидацию ДТП (–20 %).

3. Для науки: первая реализация гибридной ML + SUMO-модели с динамическим обучением.

В области интеллектуальных транспортных систем А.С. Беренгарденом и В.С. Астаховым предложен сопоставительный обзор двух востребованных программных комплексов, применяемых в сфере транспортного моделирования: SUMO и PTV Vissim. Выбор в пользу SUMO или PTV Vissim зависит от специфических потребностей исследователя или инженера [9].

«SUMO обеспечивает микроскопическое моделирование, позволяя углубленно изучать поведение отдельных транспортных средств и их взаимодействие с дорожной сетью. Активно применяется в научных исследованиях транспортной инфраструктуры, при создании систем регулирования трафика и для оценки результативности различных транспортных решений. Простой интерфейс привлекателен для академических исследователей. Важно отметить, что открытый характер SUMO способствует формированию активного сообщества» [10].

«PTV Vissim предлагает возможности как макро-, так и микроскопического моделирования, позволяя анализировать транспортные потоки ... с разной степенью детализации. Часто используется инженерами и градостроителями для проектирования и оценки дорожной сети, а также для разработки и тестирования систем координированного управления светофорами» [11].

Задачи, решаемые программами моделирования транспортных потоков [9]:

1. Проектирование инфраструктуры: оказание помощи в разработке и анализе новых проектов или модернизации существующих дорожных сетей.

2. Управление транспортными потоками: применение для разработки и тестирования стратегий управления светофорным движением, развития ИТС.

3. Исследования и аналитика: предоставление инструментов для анализа влияния на транспортные потоки различных факторов, таких как изменения в дорожной сети, трансформация городской среды и пр.

4. Безопасность и производительность: использование для оценки БДД, анализа эффективности систем общественного транспорта и др.

В SUMO элементами дорожной сети выступают отрезки, представляющие собой дороги или перекрестки. Соединяясь посредством узлов, дороги формируют транспортный граф. Возможно определение приоритетов для различных типов дорог и транспортных средств. Управление конфликтными участками на светофорах осуществляется путем настройки временных интервалов для различных направлений движения. SUMO позволяет создавать дорожную инфраструктуру, включая дороги, перекрестки, светофоры, и настраивать такие параметры трафика, как распределение скоростей и плотность движения, для более реалистичного моделирования транспортных потоков (рис. 2).

PTV Vissim предоставляет функционал для создания зон ограничения скорости и установки желаемой скорости. Такие зоны обычно размещаются на поворотах или перекрестках и позволяют задавать индивидуальную скорость для различных классов транспортных средств при маневрировании. Программа оснащена гибкой системой управления светофорами, позволяющей задавать различные фазы и программы для

оптимизации движения. PTV Vissim создает файл сценария с использованием синтаксиса XML (рис. 3).



Рис. 2. Маршруты транспортного средства в SUMO [8]

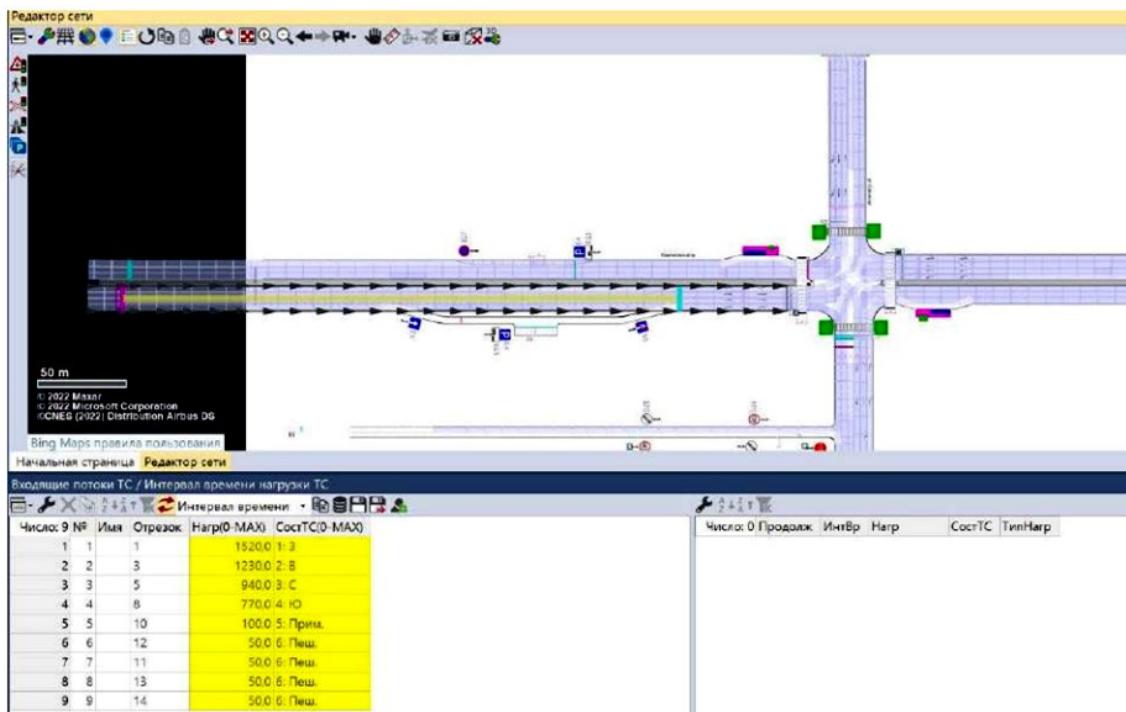


Рис. 3. Графическое отображение маршрута транспортного средства в PTV Vissim [8]

В заключение приведем описание основного бизнес-процесса ИТС по организации БДД. На рис. 4 представлена BPMN-схема (Business Process Model and Notation). Она позволяет визуализировать и анализировать потоки работ, взаимодействие участников и логику выполнения задач.

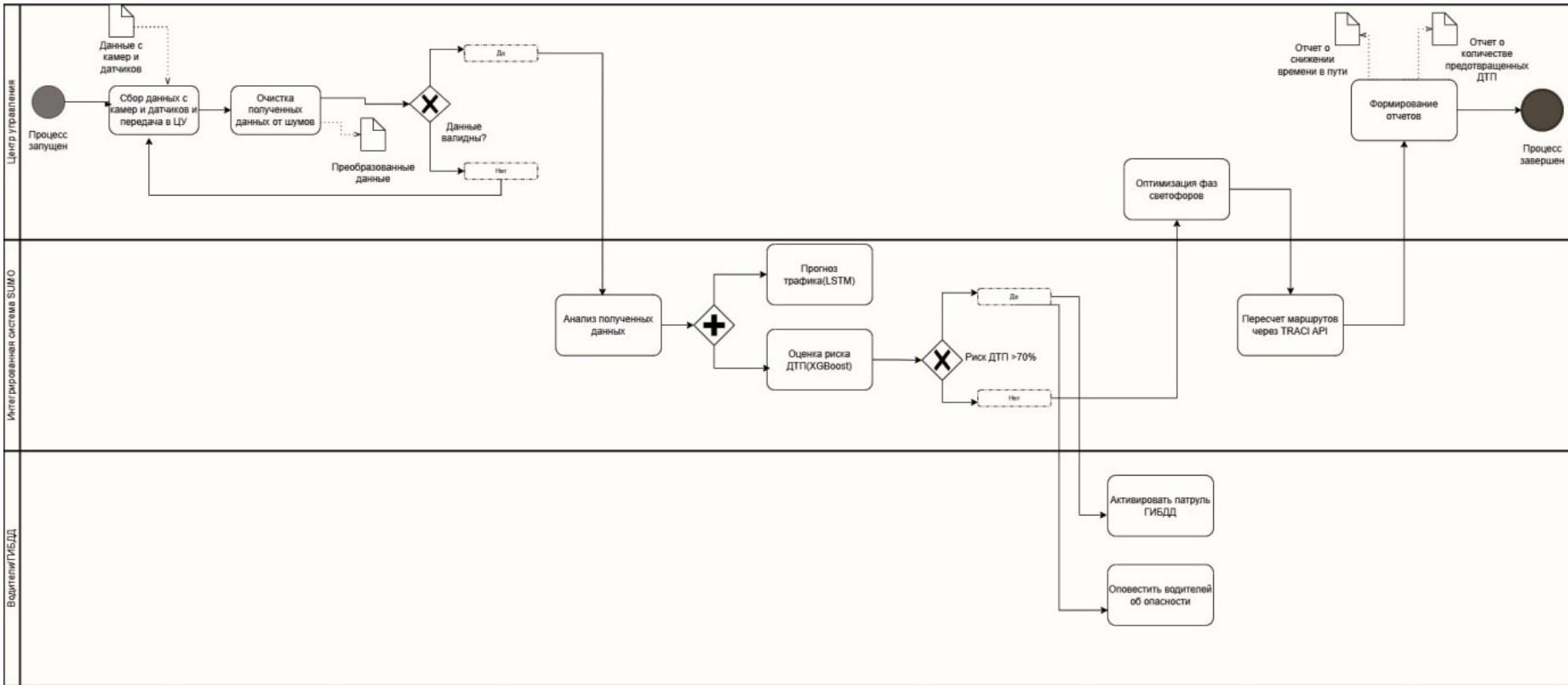


Рис. 4. BPML-схема бизнес-процесса ИТС по организации БДД

После запуска процесса на шаге 1 происходит сбор данных с камер и радаров по фиксации скорости, количества транспортных средств и аварийных событий. Эти данные передаются в ЦУДД.

На шаге 2 «Препроцессинг» происходит обработка полученных данных, включающая в себя их очистку от шумов и нормализацию моделей машинного обучения для подготовки к дальнейшему анализу.

На шаге 3 выполняется анализ и прогнозирование. Шаг разбит на две ветки:

- ветка 1: прогнозирование заторов (LSTM);
- ветка 2: классификация рисков ДТП (XGBoost).

На шаге 4 принимаются решения исходя из следующего условия: если риск ДТП $>70\%$, то запускается аварийный сценарий, при котором передается сигнал ГИБДД для активации патруля и предотвращений аварий, а также осуществляется оповещение водителей об опасных ситуациях; в ином случае через ЦУДД оптимизируются фазы светофоров.

На шаге 5 «Исполнение» происходит симуляция дорожной ситуации в системе SUMO, в результате которой осуществляется пересчет маршрутов с использованием TraCI API (интерфейс для взаимодействия с симуляцией трафика SUMO) для нахождения оптимального решения.

На заключительном шаге 6 оценивается эффективность процесса и формируются отчеты по снижению времени в пути и количеству предотвращенных ДТП.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанная методика управления транспортными потоками, основанная на современных методах анализа данных и математического моделирования, применима для осуществления процесса управления БДД в ТС.

Ключевые достижения

1. Разработанный инструментарий:

- а) для обработки данных: созданы алгоритмы интеграции гетерогенных источников (ГИС, детекторов, камер фотовидеофиксации) с погрешностью $\leq 5\%$;
- реализована нормализация данных:

$$\tilde{x} = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad (16)$$

где μ – среднее значение;

σ – среднеквадратическое отклонение;

б) для прогнозирования: LSTM-сети показали точность 89,2 % (F1-score) при прогнозе заторов на 30 мин;

в) для оптимизации: метод SQP должен обеспечить сходимость за 50 итераций с улучшением целевой функции на 23 %.

2. Научная новизна:

предложен гибридный подход (IDM + машинное обучение), снижающий ошибку моделирования скорости на 18 % по сравнению с классическими методами;

разработана методика калибровки параметров IDM:

$$\min_{a,b,T} \sum_{i=1}^N (v_{sim}^i - v_{real}^i)^2. \quad (17)$$

3. Практическая значимость:

для ИТС: подтверждена возможность интеграции с SUMO через TraCI API (время отклика <1 с); создан цифровой двойник тестового участка (погрешность воспроизведения потоков $\leq 7\%$);

для управления: алгоритмы адаптивного регулирования сократили время поездки на 14 % в симуляции; выявлены критические параметры для мониторинга (загрузка полосы >85 %, скорость <30 км/ч).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов подтверждает предпочтительность применения инструментария адаптивного управления транспортными потоками, который помогает быстро выявлять изменения во внешней среде, анализировать их последствия и корректировать свои действия. Инструментарий включает в себя модели и методы для анализа текущей ситуации и управления движением, ИТС и т. д.

Применяемые методы создают теоретическую и технологическую основу для внедрения адаптивных систем управления транспортом. Результаты готовы к апробации на реальных объектах дорожной сети в рамках пилотных проектов и будут иметь практическую ценность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. URL: <http://consultant.ru> (дата обращения: 15.07.2025).
2. Долгосрочный прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года от 11 ноября 2018 года. URL: <http://economy.gov.ru> (дата обращения: 15.07.2025).
3. Миротин Л.Б., Покровский А.К., Некрасов А.Г. Управление социально-техническими системами: учебное пособие. М.: Академия, 2014. 190 с.
4. Курганов В.М. Логистические транспортные потоки: учебно-практическое пособие. М.: Дашков и К°, 2003. 249 с.
5. Евстигнеев И.А. Основы создания интеллектуальных транспортных систем в городских агломерациях России. М.: Перо, 2021. 294 с.
6. Щёголев М.П., Клюшин А.Ю. Основы оптимизации транспортного потока для развития сети автомобильных дорог // *Транспорт. Экономика. Социальная сфера (Актуальные проблемы и их решения): Сборник статей XI Международной научно-практической конференции*. Пенза: Пензенский ГАУ, 2024. С. 306–309.
7. Щёголев М.П., Клюшин А.Ю. Основы совершенствования интегрированных систем управления безопасностью дорожного движения // *Транспорт. Экономика. Социальная сфера (Актуальные проблемы и их решения): Сборник статей XI Международной научно-практической конференции*. Пенза: Пензенский ГАУ, 2024. С. 309–313.
8. Хайндман Р., Атанасопулос Дж. Прогнозирование: принципы и практика. М.: ДМК-Пресс, 2023. 459 с.
9. Сравнительный анализ двух ведущих программных продуктов для моделирования транспортного потока. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnenie-kompyuternyh-produktov-dlya-modelirovaniya-dorozhnogo-trafika-ptv-i-sumo/viewer> (дата обращения: 15.07.2025).
10. Документация SUMO. URL: [http://Documentation-SUMO Documentation \(dlr.de\)](http://Documentation-SUMO Documentation (dlr.de)) (дата обращения: 15.07.2025).
11. Краткое руководство по выполнению проектов в PTV Vissim 6. URL: https://bespalovdotme.files.wordpress.com/2017/03/quickstart_vissim_6-0.pdf (дата обращения: 15.07.2025).

Для цитирования: Ключин А.Ю. Инструментарий адаптивного управления транспортными потоками в интеллектуальных транспортных системах // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 72–82.

METHODS AND TOOLS FOR ADAPTIVE TRANSPORT FLOW MANAGEMENT IN TRANSPORT SYSTEMS

A.Yu. KLYUSHIN, Cand. Sc.

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

The article is devoted to the set of means used to implement the process of road safety management in transport systems. This requires, first of all, the construction of realistic models of traffic flows, which will bring positive changes in reducing traffic intensity and thus increase the efficiency of the hybrid intelligent transport system. The article proposes the improvement of applied research methods based on a hybrid approach to adaptive traffic flow management.

Keywords: transportation system, automated traffic management system, traffic safety, adaptive control, hybrid intelligent system.

Поступила в редакцию/received: 01.08.2025; после рецензирования/revised: 25.08.2025;
принята/accepted: 25.08.2025

УДК 004.896

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-82-90

АРХИТЕКТУРА МОДЕЛИ АГЕНТА С АВТОНОМНЫМ ПОВЕДЕНИЕМ

Г.П. ВИНОГРАДОВ, д-р техн. наук, Н.В. КИРСАНОВА, ст. препод.

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

© Виноградов Г.П., Кирсанова Н.В., 2025

Разработка моделей и алгоритмов поведения искусственных сущностей (агентов), демонстрирующих автономное поведение, соответствующее их личностному и мотивационному состоянию, а также условиям окружающей среды, является актуальной проблемой. Автономность сущности предполагает наличие внутренней структуры и механизма, позволяющих ей иметь собственные потребности и интересы; на их основе она будет динамически генерировать и выбирать цели, которые определяют самостоятельное автономное поведение. Внутренняя мотивация позволяет агенту функционировать и демонстрировать поведение, даже при отсутствии внешних стимулов, благодаря постоянному изменению его внутреннего эмоционального и физиологического состояния. В статье предложены архитектура и модель для представления внутренних движущих факторов интеллектуальных виртуальных агентов и управления ими с использованием концепции мотивации.

Ключевые слова: рефлексивное управление, автономное поведение, принятие решений, модель, компромисс.

ВВЕДЕНИЕ

Правдоподобность поведения виртуальных сущностей в сценариях – одна из проблем автоматизированных обучающих систем. Она состоит в том, чтобы обучаемый поверил, что взаимодействует с живым персонажем, существование которого логично и последовательно в контексте сценария.

Следует определить понятие «поведение» и его свойства. В литературе обсуждаются такие свойства поведения, как правдоподобность, достоверность и реалистичность. Отмечено, что реализм не является ни обязательным, ни достаточным условием для обеспечения правдоподобности. Правдоподобность часто связывают с внешним видом и способом выражения внутреннего состояния, например, посредством движений агента или с помощью коммуникативных средств [1]. Однако практика использования подобных понятий требует, чтобы в центре анализа находилось не проявление правдоподобного поведения, а его генерация, т. е. способность агента действовать в соответствии со своими целями, состоянием и личностными особенностями. Следовательно, поведение должно рассматриваться как процесс принятия решений, отвечающих внутреннему состоянию субъекта и условиям внешней среды, а также как последовательность базовых действий, направленных на реализацию решений в соответствии с физическим и эмоциональным состоянием и чертами характера субъекта. Для этого нужно определить базовый механизм, который позволяет принимать решение о том, что нужно делать агенту в данный момент, а также воплощать решения в последовательность действий, релевантных внутреннему состоянию агента, с учетом условий окружающей среды.

Следует отметить, что правдоподобность поведения не обязательно подразумевает сложное и «интеллектуальное» реалистичное поведение. Оно должно быть *рациональным, реактивным, проактивным, индивидуальным и эмоциональным*, демонстрируя согласованность реакций мотивационных состояний.

1. АВТОНОМНОСТЬ КАК НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ ПРАВДОПОДОБИЯ

Правдоподобность предполагает наличие у агента автономности поведения. Автономность – это свойство агента, которое проявляется в способности сформировать набор целей для выполнения миссии и представляет собой внутреннюю движущую силу. В противном случае такой агент может быть охарактеризован как автоматизированный, а не автономный, так как его цели заданы во время разработки его создателем, на что указывали Булдридж и Дженнингс [2]. Таким образом, истинная автономия подразумевает способность у агента выбирать и ставить собственные цели. Для этого субъект должен обладать собственными потребностями и желаниями, которые могут выступать в качестве внутренних мотивационных механизмов, побуждающих агента к действию, а не ждать команд от пользователя или следовать заранее прописанному сценарию.

Данная работа направлена на решение проблемы моделирования принятия субъективно рациональных решений естественной или искусственной сущностью, обладающей способностью эндогенно формировать цели, исходя из обязательств и своих интересов [3–5]. Цель исследования заключается, в том числе, в создании биотехнических комплексов и систем, которые бы действовали таким образом, чтобы по результатам их работы невозможно было бы отличить от действий разумного человека. Одним из подходов к решению этой проблемы является агентно-ориентированное программирование [6]. Агент рассматривается как система, способная

адекватно реагировать на изменение внешней среды, не предусмотренное явно встроенными поведенческими механизмами [7].

Ключевым элементом здесь выступает концепция субъективно рационального выбора, согласно которой мотивация выбора определяется как внешними, так и внутренними факторами. Последние отражают интересы субъекта, индуцируемые его потребностями и этической системой, которой он придерживается. Оценки удовлетворенности текущей ситуацией целеустремленного состояния субъектом, как показано в работе [4], могут приводить к изменению структуры интересов субъекта, и он ее может выбирать. Поскольку предпочтения субъекта в процессе выбора отражают его интересы, то можно определить множество G альтернативных вариантов структуры предпочтений [1], которые будем называть *структурными альтернативами*.

2. ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ

1. Выбор осуществляется субъектом на основе его представлений о ситуации целеустремленного состояния, которая формально определена [4]. Представления формируются путем восприятия субъектом своего окружения. **Уровни восприятия окружения** – это семь подмножеств систем, в которых представлены и обособлены *субъективные модели среды и собственного поведения* индивида [4].

2. Формирование представлений реализуется на основе процедур восприятия, осознания и анализа в соответствии с когнитивными возможностями субъекта. Компоненты представления отражают различные аспекты понимания субъектом ситуации целеустремленного состояния и образуют информационную структуру представлений. Множество возможных вариантов представлений обозначим X .

3. Множество состояний окружения S и множество наблюдаемых состояний окружения X удовлетворяют условию $S \cap X \neq \emptyset$, т. е. представления субъекта могут содержать как объективную составляющую, так и фантомную.

4. Структурные альтернативы субъект выбирает в зависимости от оценок удовлетворенности значениями свойств ситуации целеустремленного состояния.

В соответствии с введенными предположениями субъект при принятии решений использует три множества альтернатив: управляющие C (способы действия), структурные G и идентификации X . Это позволяет предположить существование трех виртуальных сторон, осуществляющих выбор соответствующих альтернатив. Правила выбора таких альтернатив в зависимости от понимания субъектом обстановки и структуры своих интересов будем называть *стратегиями*.

Пусть принятие решения выполняется в несколько циклических этапов, способы действия выбираются на каждом этапе ($n = 1, 2, \dots$) из множества C в зависимости только от представления о состоянии окружения $x \in X$. Это связано с тем, что совместный надсознательный (интуитивный) и сознательный (формальный) анализы состояния окружения позволяют в многократных итерациях принять сначала смутно осознаваемое, а затем все более четко формулируемое и обоснованное решение. При этом существуют ограничения $C_X \subseteq C$ на допустимость выбора альтернатив в зависимости от представлений о состоянии окружения $x \in X$. Динамика процессов в окружении субъекта недоступна прямому восприятию, поэтому представление о ней формируется путем применения процедур идентификации, суть которых сводится к выбору варианта представлений в зависимости от наблюдаемого состояния. Известны ограничения $X_S \subseteq X$ на допустимость представлений в качестве альтернатив идентификации в зависимости от наблюдаемых состояний $s \in S$.

Из этих предположений введем определения стратегий [1]:

однозначное отображение $\lambda : X \rightarrow C$ такое, что $\lambda(x) \in C_x, x \in X$, называется функцией выбора или управления;

упорядоченный набор $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \equiv \lambda_1^n$ – стратегией выбора на горизонте длины $n < \infty$;

$\lim \{\lambda_1^n\} = \lambda_1^{n_\infty}$ при $n \rightarrow \infty$ будем называть стратегией, направленной на достижение локального идеала, определяющего смысл существования субъекта.

Однозначное монотонное отображение $\xi : S \rightarrow X$ такое, что $\xi(s) \in X_s, s \in S$, называется функцией идентификации; упорядоченный набор $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) \equiv \xi_1^n$ – стратегией идентификации на горизонте длины $n, n \rightarrow \infty$; последовательность $\{\xi_1^n, n = 1, 2, \dots\}$ – стратегией идентификации на ограниченном горизонте. Поскольку субъект стремится к формированию полезных представлений, то существует $\lim \{\xi_1^n\} = \xi_1^{n_\infty}$ при $n \rightarrow \infty$.

Так как множества S и X удовлетворяют условию $|S| > |X|$, то однозначное отображение $\xi : S \rightarrow X$ порождает разбиение множества S на подмножества $\xi^{-1}(x) = \{s \in S : \xi(s) = x\} \subset S, x \in X$.

Подмножества $\xi^{-1}(x) \subset S$ и $x \in X$ являются связанными множествами, т. е. любой элемент $s \in \xi^{-1}(x)$ однозначно определяет соответствующее представление $x \in X$. Подмножества $\xi^{-1}(x) \subset S, x \notin X$, образуют классы эквивалентных представлений, что позволяет для формализации представлений субъекта использовать методы теории мягких вычислений [4].

Выбранная в момент n структурная альтернатива $\gamma_n \in G$ является *структурным выбором* на n -м шаге принятия решений; упорядоченный набор $(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n) \equiv \gamma_1^n$ *стратегией структурного выбора на горизонте принятия решений длины $n < \infty$* ; последовательность $\{\gamma_1^n, n = 1, 2, \dots\}$ – *стратегией структурного выбора на ограниченном горизонте*. Поскольку субъект стремится к соответствуанию своей структуры интересов требованиям принятой им этической системы, то существует $\lim \{\gamma_1^n\} = \gamma_1^{n_\infty}$ при $n \rightarrow \infty$.

3. МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СТРУКТУРОЙ ПРЕДПОЧТЕНИЙ

Критерий выбора стратегии управления [4] имеет смысл *ожидаемой удельной ценности* целеустремленного состояния по результату. Формализация удельной ценности имеет вид функции полезности $E\varphi^g(C \times S \times X)$, зависящей от структурной альтернативы $g \in G$, как от параметра. Поскольку **процесс управления начинается с некоторой ситуации** $x \in X$, то критерий $E\phi_n(\lambda_1^n | \gamma_1^n)$ будет зависеть и от ситуации $x \in X$, как от начального условия. Так как множество ситуаций X конечно, то критерий $E\phi_n(\lambda_1^n | \gamma_1^n)$ будет окончательно представляться вектором в пространстве R^X размерности $|X|$. Его компоненты будем записывать в виде $E\phi_n(\lambda_1^n | \gamma_1^n)(x), x \in X$. По результату выбора субъект испытывает эмоциональное переживание, поэтому качество стратегии структурного выбора γ_1^n следует описать в виде критерия, имеющего смысл «удовлетворенности результатами выбора». Следовательно, качество стратегии γ_1^n естественно описывать сверткой вектора ожидаемой полезности

$E\phi_n(\lambda_1^n | \gamma_1^n) \in R^X$ в некоторый функционал $\mu : R^X \rightarrow R^I$. Тогда критерий качества стратегии γ_1^m можно записать в виде $\mu_n(\lambda_1^n | \gamma_1^n) = \mu(E\phi_n(\lambda_1^n | \gamma_1^n)) \in R^I$.

Качество своих представлений субъект связывает с оценками возможности достижения желаемых состояний от управления $c \in C$, а также с возможностью расширения множества $C \uparrow$ путем включения в него эффективных альтернатив. У. Эдвардс [8] в качестве критерия оценки представлений предлагает использовать термы лингвистической переменной «полезность», которые строятся на значениях $E\phi_n(\lambda_1^n | \gamma_1^n)$. При этом оценки полезности будут зависеть от стратегий управления λ_1^n структурного выбора γ_1^n как от заданных условий. Обозначим критерий «полезность» как $\psi_n(\xi_1^n | \lambda_1^n, \gamma_1^n)$. Поскольку процесс идентификации начинается с некоторого состояния $s \in S$, то этот критерий будет зависеть от состояния $s \in S$, задаваемого в качестве начального условия. Так как при этом множество состояний S конечно, то критерий идентификации будет представляться вектором $\psi_n(\xi_1^n | \lambda_1^n, \gamma_1^n) \in R^S$ в пространстве R^S размерности $|S|$.

В ситуации целеустремленного состояния качество стратегий управления и структурного выбора описывается критериями: $E\phi_n(\lambda_1^n | \gamma_1^n) \in R^X$, имеющим смысл удельной ценности по результату; $\mu_n(\gamma_1^n | \lambda_1^n) \in R^I$, представляющим смысл удовлетворенности результатами выбора, и критерием качества стратегии идентификации $\psi_n(\xi_1^n | \lambda_1^n, \gamma_1^n) \in R^S$, его смысл – полезность представлений для достижения желаемых состояний. Использование введенных критериев предполагает определение соответствующих информационных структур или моделей, позволяющих выполнить соответствующий выбор [9].

Предположим существование информационной структуры представлений I , которая отражает знания и опыт субъекта о 1) способах действия (управления); 2) своих интересах и предпочтениях; 3) динамике перехода окружения в различные состояния.

Тогда можно считать, что существует структурное преобразование этой структуры в *информационную структуру*, обеспечивающую возможность построения критерия удельной ценности $E\phi_n(\lambda_1^n | \gamma_1^n)$ и модели предметной области. Такое преобразование станем называть «преобразованием удельной ценности» и обозначать U , а индуцируемую им информационную структуру – «информационной структурой удельной ценности ситуации целеустремленного состояния по результату» и обозначать $U = U(I)$.

Аналогично, если существует структурное преобразование структуры I в информационную структуру, обеспечивающую возможность построения критерия идентификации $\psi_n(\xi_1^n | \lambda_1^n, \gamma_1^n)$ и модели процедур идентификации, то такое преобразование будем называть «преобразованием идентификации» и обозначать R , а индуцируемую им информационную структуру будем называть «информационной структурой идентификации» и обозначать $R = R(I)$.

Представления субъекта о ситуации целеустремленного состояния являются субъективными и качественными, построенными на основе наблюдений и анализа процесса перехода окружения под действием управления $c \in C$ в различные состояния $s \in S$. Обозначим правило такого перехода через $q^g(S | S \times C)$ – из $S \times C$ в S . Фактически субъект для оценки ценности возможных результатов использует

построенную по результатам стратегии идентификации ξ_1^n модель $Q^g(X|X \times C)$ – из $X \times C$ в X . При ее построении учитываются стратегии управления λ_1^n , структурного выбора γ_1^n либо такими стратегиями он задается. Это означает, что преобразование фактической функции $q^g(S|S \times C)$ в функцию понимания субъектом процессов в его окружении $Q^g(X|X \times Y)$ возможно лишь в апостериорном режиме в зависимости от используемых стратегий $(\lambda_1^n, \gamma_1^n, \xi_1^n)$. Такое преобразование и построение критерия ожидаемой удельной ценности $E\phi_n(\lambda|\gamma_1^n)$ возможно при последовательном формировании информационных структур «полезности» в зависимости от используемых стратегий. Это условие запишем в виде $U_n = U(\lambda_1^n, \gamma_1^n, \xi_1^n)(I)$, $n=1, 2, \dots$. Поскольку оно необходимо для формирования критерия ожидаемой полезности и модели предметной области, то должно указываться всякий раз при его использовании. Отметим, что критерий $E\phi_n(\lambda_1^n|\gamma_1^n)$ неявно зависит от стратегии идентификации ξ_1^n за счет введения в модель выбора индуцированной структуры U_n . Как отмечено выше, критерий $\mu_n(\gamma_1^n|\lambda_1^n) \in R^1$ качества структурного выбора определяется сверткой критерия $E\phi_n(\lambda_1^n|\gamma_1^n) \in R^X$. Общность информационной структуры их формирования позволяет записать

$$\left\{ \begin{array}{l} E\phi_n(\lambda_1^n|\xi_1^n) \\ \mu_n(E\phi_n(\xi_1^n|\lambda_1^n)) \\ U_n = U(\lambda_1^n, \gamma_1^n, \xi_1^n)(I). \end{array} \right.$$

Для построения критерия идентификации требуется использовать некоторую функцию, которая имела бы смысл полезности. Для этого необходимо построить вербальные оценки на значения функции полезности $E\phi^g(S \times X \times Y)$. Требуемое преобразование существует и может выполняться в априорном режиме (от предшествующего до выбора решений).

Такое преобразование определяется субъектом относительно нечеткой меры, построение которой возможно, если задана функция $q^g(S|S \times C)$ из $S \times C$ в S . Поскольку ее аналог в сознании субъекта имеет вид $Q^g(X|X \times C)$ и однозначно задан в информационной структуре I , то, следовательно, дополнительных преобразований не требуется. Построение функции полезности представлений исчерпывает необходимое структурное преобразование. С учетом этих соображений критерий идентификации окончательно запишем в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_n(\xi_1^n|\lambda_1^n, \gamma_1^n), \\ R = R(I). \end{array} \right.$$

Из введенных определений и построений следует, что критерии качества этих видов стратегий различны и взаимозависимы. Тогда проблема выбора имеет игровое содержание и сводится к отысканию устойчивого компромисса между стремлением к максимизации ожидаемой удельной ценности целеустремленного состояния

по результату и минимизации возможных потерь от неправильных представлений. Такой компромисс называется *равновесием*.

Заметим, что поскольку информационная структура «удельной ценности» $U_n = U(\lambda_1^n, \gamma_1^n, \xi_1^n)(I)$, в условиях которой строится критерий $\mu_n(E\phi_n(\gamma_1^n | \lambda_1^n))$, должна формироваться последовательно в зависимости от используемых стратегий, то искомые равновесия не только будут взаимозависимы на каждом этапе $n = 1, 2, \dots$ формирования решений, но и зависеть от решений, выбираемых на предшествующих шагах. С учетом этого такие равновесия можно называть *динамическими*.

Согласно предположениям, количество циклов формирования решения не ограничено. Тогда динамические равновесия должны иметь смысл, в том числе при $n \rightarrow \infty$. Для их существования естественно потребовать выполнения дополнительных условий:

1) при $n \rightarrow \infty$ критерии качества стратегий должны стремиться к некоторым пределам;

2) такие пределы не должны зависеть от начальных условий.

Поскольку критерии в явном виде не заданы, то выполнение этих свойств неочевидно; требуется задание нужных свойств и указания явного вида критериев, удовлетворяющих этим свойствам.

Предлагаемый подход позволяет связать реактивные и целенаправленные иерархические системы классификаторов с функциональными возможностями иерархии свободного потока [10], что дает возможность избежать потерь информации и сформировать поведение, характерное для эффективных механизмов выбора действий. Система избирательного внимания помогает архитектуре выбирать соответствующее поведение.

Ключевая идея «иерархии свободного потока» заключается в том, что во время распространения активности по иерархии никакие решения не принимаются до тех пор, пока не достигнут самый низкий уровень в иерархии (уровень действия). В этом случае возможно суммирование активности, и в результате выбирается наиболее активированный узел, что повышает реактивность и гибкость иерархических систем благодаря неограниченному потоку информации, сочетанию предпочтений и возможности поиска компромиссных и оппортунистических кандидатов в варианты решений.

4. МОТИВАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ВЫБОРА ДЕЙСТВИЙ

Такая модель основана на перекрывающихся системах иерархических классификаторов, работающих параллельно для создания планов поведения. Это связано с функциональными возможностями иерархии свободного потока для распространения активности, придающей реактивность и гибкость иерархической системе.

В модели параллельно выполняются иерархические циклы принятия решений, по одному для каждой мотивации. Цикл принятия решений для одной мотивации содержит *четыре уровня*:

1. Внутренняя переменная представляет собой гомеостатическое внутреннее состояние виртуального человека и изменяется в зависимости от результатов действий. Механизм выбора действий должен поддерживать их в зоне комфорта.

2. Мотивация – это абстракция, соответствующая тенденции вести себя определенным образом в соответствии с информацией об окружающей среде и «субъективной оценке» внутренних переменных и гистерезиса. Мотивации устанавливают для виртуального человека цели, соответствующие внутренним переменным.

3. Целенаправленное поведение представляет собой внутренний контекст виртуального человека. Иерархическая система классификаторов используется для планирования последовательности действий (например, для достижения конкретных целей). В итоге виртуальный агент может выполнять мотивированные действия, удовлетворяющие мотивации.

4. Действия делятся на *два типа*: промежуточные действия используются для подготовки виртуального агента к выполнению мотивированных действий [11], которые могут удовлетворить одну или несколько мотиваций. Промежуточные действия часто связаны с перемещением виртуального человека к определенным целям для выполнения мотивированных действий. Оба типа действий оказывают обратное действие на внутренние переменные. Промежуточные действия увеличивают их, в то время как мотивированные уменьшают.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования показывают, что предложенная модель является достаточно гибкой и надежной для моделирования мотивационных автономных виртуальных агентов в режиме реального времени. Архитектура модели позволяет динамически генерировать реактивное и целенаправленное поведение. Процесс принятия решений эффективен и последователен, в каждый момент времени выбирается наиболее подходящее действие с учетом множества противоречивых мотиваций и в соответствии с восприятием субъектом окружающей среды. Кроме того, список мотиваций в модели не ограничен и может быть легко расширен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов В.В. Динамические равновесия в задачах стохастического управления и принятия решений при неопределенностях // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2002. № 3. С. 77–93.
2. Wooldridge M., Jennings N.R. Intelligent agents: theory and practice // *The Knowledge engineering review*. 1995. V. 10. Is. 2. P. 115–152.
3. Лефевр В.А. Конфликтующие структуры. М.: Советское радио, 1973. 158 с.
4. Виноградов Г.П., Кузнецов В.Н. Постнеклассические научные исследования сетевых отношений в интеллектуальных организациях. // *Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT'14»*. В 4 т. М.: Физматлит, 2014. Т. 1. С. 423–429.
5. Виноградов Г.П., Борисов П.А., Семенов Н.А. Интеграция нейросетевых алгоритмов, моделей нелинейной динамики и методов нечеткой логики в задачах прогнозирования // *Известия РАН. Теория и системы управления*. 2008. № 1. С. 78–84.
6. Виноградов Г.П., Шматов Г.П., Борзов Д.А. Формирование представлений агента о предметной области в ситуации выбора // *Программные продукты и системы*. 2015. № 2 (110). С. 83–94.
7. Лебедев В.В., Лебедев К.В., Тюпикова Т.В. Компьютерное моделирование налогообложения // *Вестник университета*. 2018. № 12. С. 128–135.
8. Edwards W., Tversky A. Decision making. England, Harmondsworth Middlesex: Penguin Books, 1972. 480 p.
9. Алехин Т.Ю. Основные направления использования технологий искусственного интеллекта в интересах обеспечения обороны и безопасности государства // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2023. № 1 (17). С. 87–91.
10. Tyrrell T. The use of hierarchies for action selection // *Adaptive Behavior*. 1993. V. 1. № 4. P. 387–420.

11. Бородин А.С., Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е. Искусственный интеллект в сетях связи пятого и последующих поколений // Электросвязь. 2021. № 1. С. 17–22.

Для цитирования: Виноградов Г.П., Кирсанова Н.В. Архитектура модели агента с автономным поведением // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 82–90.

THE ARCHITECTURE OF THE AGENT MODEL WITH AUTONOMOUSE BEHAVIOR

G.P. VINOGRADOV, Dr. Sc., N.V. KIRSANOVA, Senior Lecturer

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

Development of models and algorithms for the behavior of artificial entities (agents), demonstrating autonomous behavior, that correspond to their personal and motivational state, as well as environmental conditions, is an actual problem. Entity autonomy assumes the presence of an internal structure and mechanism that allow you to have your own needs and interests, based on them it will dynamically generate and choose goals that define self-reliance autonomous behavior. Internal autonomous allows the agent to function and demonstrate behavior, even in the absence of external stimuli, due to the constant change in its internal emotional and physiological state. This work offers the architecture and the model for representing internal driving factors of intelligent virtual agents, as well as and managing them using the concept of motivation.

Keywords: reflexive management, autonomous behavior, decision-making, model, compromise.

Поступила в редакцию/received: 30.09.2025; после рецензирования/revised: 07.10.2025;
принята/accepted: 10.10.2025

УДК 004.02

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-90-98

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЕРСОНАЛА НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ

С.В. ТОРШИН, асп., А.В. КАПИТАНОВ, д-р техн. наук

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
127055, Москва, пер. Вадковский, д. 1, e-mail: av.kapitanov@stankin.ru

© Торшин С.В., Капитанов А.В., 2025

Управление процессом формирования рабочих коллективов из числа персонала на промышленных предприятиях в редких случаях основано на какой-либо определенной информации. Учитывая, что производственный процесс требует высокого

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (28), 2025*

уровня профессионализма персонала и быстрой адаптации к изменениям, традиционные подходы к оценке компетенций и профессиональных возможностей сформированной команды могут оказаться недостаточными. Чаще всего для принятия решений требуются разнородные данные. В статье приведены аргументы в пользу того, что методология теории нечетких множеств может быть использована в решении вопросов оценки различных качеств персонала и позволит принимать рациональные управленческие решения в процессе расстановки штата. Она позволяет учесть неопределенности и субъективные факторы при оценке уровня знаний и навыков сотрудников и создавать более точные и многоаспектные модели компетенций, которые включают как объективные показатели, так и экспертные оценки. Данные модели могут использоваться в информационно-аналитических системах поддержки принятия управленческих решений при расстановке штата.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, комплектация производственного персонала, цифровая модель компетенций, эффективность производственного процесса, теория нечетких множеств.

ВВЕДЕНИЕ

Оперативное планирование персонала на современном промышленном предприятии является одной из ключевых задач, влияющих на эффективность всего производственного цикла. Традиционно при расстановке сотрудников по сменам или внутри производственной бригады используются четкие количественные критерии, такие как квалификация, стаж работы, опыт и т. д. Однако реальные производственные ситуации часто характеризуются значительной степенью неопределенности и неоднозначности, что затрудняет применение классических методов оценки и принятия решений. Поэтому аксиомы и теоремы математического анализа и теории вероятностей в данном случае не могут в полной мере учесть все неопределенности имеющихся характеристик [1]. Теория вероятности, к примеру, имеет место в случае большого количества анализируемых данных. В решении задач расстановки персонала чаще всего источником неопределенности выступает нечеткость или расплывчатость характеристик, а не случайность.

Теория нечетких множеств, разработанная Лотфи Заде в 1965 году [2], представляет собой мощный инструментарий для обработки такой неопределенности. Она позволяет работать с лингвистическими переменными, более точно отражающими реальную ситуацию, чем традиционные числовые величины.

Следует также отметить, что разработка и внедрение новых элементов методологии управления персоналом происходит постоянно, поскольку результатом эффективной и качественной работы сотрудников будет являться конечная эффективность любого процесса [3]. Для помощи в принятии управленческих решений разрабатываются различные модели и алгоритмы, которые закладываются в применяемые информационные технологии. Целью данной работы является исследование применения методологии теории нечетких множеств в оценке компетенции сотрудников для дальнейшего применения в алгоритмах оперативного планирования производственного персонала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В статье исследуется возможность применения теории нечетких множеств как инструмента оценки компетенции состава производственной бригады для улучшения процесса расстановки персонала по сменам. Решение такого рода задачи может быть

применено в алгоритмах информационно-аналитических систем, используемых в целях цифровизации процессов определения потребности и распределения персонала внутри предприятия. Для реализации требуемой оценки квалификации сотрудников требуется создание модели. В качестве критериев для ее разработки определим знание технологий, опыт работы, стаж, профессиональные компетенции и возможности их дальнейшего развития, склонность к конфликтам.

В качестве математического аппарата для описания выбранных критериев будущей модели используется теория нечетких множеств, а параметры модели задаются за счет лингвистических переменных, выраженных в виде слова или словосочетания. Это является несомненным преимуществом, так как дает возможность приблизительного описания рассматриваемых характеристик, избегая применения чисел.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для примера оценки уровня компетенции некоторого сотрудника бригады введем лингвистическую переменную K («компетенция сотрудника») с множеством значений: K_1 (очень низкая), K_2 (низкая), K_3 (средняя), K_4 (высокая), K_5 (очень высокая), с универсальным множеством в виде отрезка $[0, 1]$.

Все термы множества K будут именами нечеткого множества на отрезке $[0, 1]$ и представляют собой трапециевидные нечеткие числа (рис. 1) [4].



Рис. 1. Трапециевидные нечеткие числа

В табл. 1 занесем функции принадлежности каждого терма, применяя для расчета формулу трапециевидных нечетких чисел:

$$\mu(K) = \begin{cases} 0, & \text{если } K < a_1 \\ \frac{K - a_1}{a_2 - a_1}, & \text{если } a_1 \leq K < a_2 \\ 1, & \text{если } a_2 \leq K < a_3 \\ \frac{K - a_4}{a_3 - a_4}, & \text{если } a_3 \leq K < a_4 \\ 0, & \text{если } K > a_4 \end{cases}$$

Таблица 1. Функции принадлежности терм-множеств К

K_n	Характеристика терма	Отрезок L	Функция принадлежности K_n
K_5	Очень слабый	$K_5 \in [0,00; 0,23]$	$\mu_5 = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq K \leq 0,13 \\ 10 \cdot (0,23 - K), & \text{если } 0,13 < K \leq 0,23 \end{cases}$
K_4	Слабый	$K_4 \in [0,13; 0,43]$	$\mu_4 = \begin{cases} 1 - 10 \cdot (0,23 - K), & \text{если } 0,13 < K \leq 0,23 \\ 1, & \text{если } 0,23 < K \leq 0,33 \\ 10 \cdot (0,43 - K), & \text{если } 0,33 < K \leq 0,43 \end{cases}$
K_3	Средний	$K_3 \in [0,33; 0,63]$	$\mu_3 = \begin{cases} 1 - 10 \cdot (0,45 - K), & \text{если } 0,33 < K \leq 0,43 \\ 1, & \text{если } 0,43 < K \leq 0,53 \\ 10 \cdot (0,65 - K), & \text{если } 0,53 < K \leq 0,63 \end{cases}$
K_2	Сильный	$K_2 \in [0,53; 0,83]$	$\mu_2 = \begin{cases} 1 - 10 \cdot (0,63 - K), & \text{если } 0,53 < K \leq 0,63 \\ 1, & \text{если } 0,63 < K \leq 0,73 \\ 10 \cdot (0,83 - K), & \text{если } 0,73 < K \leq 0,83 \end{cases}$
K_1	Сильнейший	$K_1 \in [0,73; 1,00]$	$\mu_1 = \begin{cases} 1 - 10 \cdot (0,83 - K), & \text{если } 0,73 \leq K < 0,83 \\ 1, & \text{если } 0,15 \leq K < 1 \end{cases}$

Для формирования заключения об уровне компетенции сотрудника эксперт может использовать анализ индикаторов его работы. Рассмотрим пример, в котором эксперт исследовал пять индикаторов:

Z_1 – выполнение сотрудником плана производства (факт выполненной работы по отношению к нормативу);

Z_2 – уровень качества производимой сотрудником продукции (количество соответствующей требуемому качеству продукции по отношению ко всей произведенной сотрудником продукции);

Z_3 – соблюдение правил техники безопасности на рабочем месте (количество дней работы без несчастного случая по отношению к общему количеству отработанных дней);

Z_4 – простои оборудования по техническим и технологическим причинам (фактически отработанное время работы оборудования, закрепленного за сотрудником, к фонду рабочего времени оборудования);

Z_5 – отсутствие сотрудника на рабочем месте по уважительным причинам (фактически отработанное время по отношению к плановому времени работы сотрудника).

Все перечисленные индикаторы принимают значения на некотором числовом отрезке и представляют собой числовые переменные. Каждую переменную необходимо рассматривать как множество, являющееся носителем лингвистической переменной C_i [5]. Составляющие термы этой переменной:

C_{i1} – очень слабый уровень индикатора Z_i ;

C_{i2} – слабый уровень индикатора Z_i ;

C_{i3} – средний уровень индикатора Z_i ;

C_{i4} – высокий уровень индикатора Z_i ;

C_{i5} – очень высокий уровень индикатора Z_i .

Схема перехода от количественных значений индикаторов к высказываниям об уровне компетенции сотрудника представлена на рис. 2.

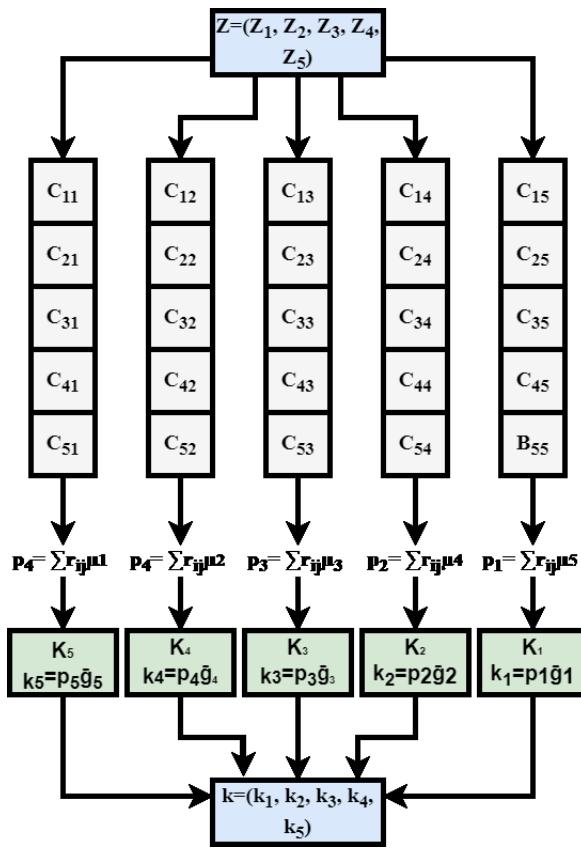


Рис. 2. Схема перехода от количественных значений индикаторов к информации об уровне компетенции сотрудника

Для того чтобы сопоставить результаты числовых значений индикаторов работы с лингвистическими переменными, следует провести ранжирование абсолютных значений индикаторов по возрастанию, от наименее важных к наиболее важным. Другими словами, необходимо сопоставить каждому индикатору Z_i его весовое значение r_i , показывающее «вклад» индикатора в уровень компетенции сотрудника. Если значения веса всех показателей отсортированы, и при этом $r_n < r_{n-1} < \dots < r_1$, то используют формулу Фишберна:

$$r_i = \frac{2(n-i+1)}{(n-1)n}.$$

Функция перехода от значений индикаторов работы сотрудника к весу термов лингвистической переменной К имеет вид

$$p_k = \sum_{i=1}^5 r_i \mu_{ri}, k = 1, 2, 3, 4, 5.$$

Значение переменной К вычисляют по следующей формуле, заранее рассчитав вес каждого терма лингвистической переменной K_i :

$$\kappa = \sum_{i=1}^5 p_k \bar{g}_k, k = 1, 2, 3, 4, 5,$$

где \bar{g}_k является серединой отрезка – носителем терма $K_k \in (a_{k1}, a_{k4})$.

В качестве примера проведем вычисления уровня компетенции сотрудника на примере машиниста гофроагрегата 5-го разряда, работающего на участке по производству гофрированных картонных листов на ООО «Павлово-Посадский гофрокомбинат», где были изучены значения производственных индикаторов за февраль и март 2025 года. Значения индикаторов (трапециевидные числа) содержатся в табл. 2, а значения μ функции принадлежности вычислены по приведенной выше формуле трапециевидных чисел.

Таблица 2. Экспертные оценки показателей

Индикатор	Терм				
	C_{i1}	C_{i2}	C_{i3}	C_{i4}	C_{i5}
Z_1	0; 0,11; 0,26	0,11; 0,25; 0,41; 0,51	0,44; 0,51; 0,53; 0,66	0,54; 0,66; 0,71; 0,76	0,71; 0,79; 1; ∞
Z_2	0; 0; 0,21; 0,23	0,21; 0,22; 0,26; 0,44	0,25; 0,42; 0,51; 0,55	0,53; 0,53; 0,66; 0,71	0,69; 0,79; 0,89; 1
Z_3	0; 0; 0,09; 0,16	0,07; 0,16; 0,22; 0,33	0,25; 0,35; 0,35; 0,41	0,36; 0,44; 0,49; 0,62	0,49; 0,67; 0,81; 1
Z_4	0; 0; 0,11; 0,26	0,11; 0,26; 0,32; 0,35	0,31; 0,3; 0,53; 0,61	0,51; 0,61; 0,67; 0,76	0,68; 0,77; 0,89; 1
Z_5	0; 0; 0,21; 0,45	0,22; 0,49; 0,51; 0,5	0,51; 0,52; 0,61; 0,72	0,62; 0,74; 0,82; 1	0,76; 0,87; 0,99; ∞

Заполним табл. 3 результатами первичной обработки индикаторов и вычислим значение функции принадлежности лингвистической переменной K = «компетенция сотрудника» за февраль и март 2025 года, взяв за основу схему из рис. 2.

Таблица 3. Первичная обработка индикаторов

Эмпирические значения индикатора		Значение функции принадлежности	
Февраль 2025	Март 2025	Февраль 2025	Март 2025
$Z_1 = 0,9$	$Z_1 = 1$	$\mu_{13} = 1$	$\mu_{15} = 1$
$Z_2 = 0,77$	$Z_2 = 0,62$	$\mu_{22} = 1$	$\mu_{25} = 0,2$
$Z_3 = 0,43$	$Z_3 = 0,55$	$\mu_{33} = 0,2$	$\mu_{34} = 0,8; \mu_{35} = 0,2$
$Z_4 = 0,9$	$Z_4 = 0,86$	$\mu_{45} = 1$	$\mu_{44} = 0,6; \mu_{45} = 0,4$
$Z_5 = 0,83$	$Z_5 = 0,94$	$\mu_{54} = 0,8; \mu_{55} = 0,2$	$\mu_{54} = 0,1; \mu_{55} = 0,9$

Получим следующие значения:

$$K_{\text{февраль } 2025} = \sum_{j=1}^5 \kappa_j \cdot \mu_{j1} = 0,93625;$$

$$K_{\text{март } 2025} = \sum_{j=1}^5 \kappa_j \cdot \mu_{j1} = 0,29554.$$

В результате применения предложенной в статье модели можно сделать вывод, что уровень компетенции машиниста гофроагрегата 5-го разряда очень высок. С

помощью предложенной модели может быть описан уровень компетенций любого сотрудника производственной бригады. К тому же предложенная модель оценки компетенций сотрудников обладает хорошей чувствительностью к числовым оценкам и позволяет минимизировать риски ошибок экспертов [6].

Использование модели позволяет делать прогнозы о том, какие комбинации сотрудников будут наиболее эффективны в той или иной смене или бригаде, а применение теории нечетких множеств в сочетании с информационно-аналитическими системами помогает улучшить качество принятия решений. Система может предоставлять рекомендации по формированию оптимальных команд, распределению ролей и задач среди сотрудников, а также предлагать меры по развитию и обучению персонала. На рис. 3. показан алгоритм поддержки принятия решений.

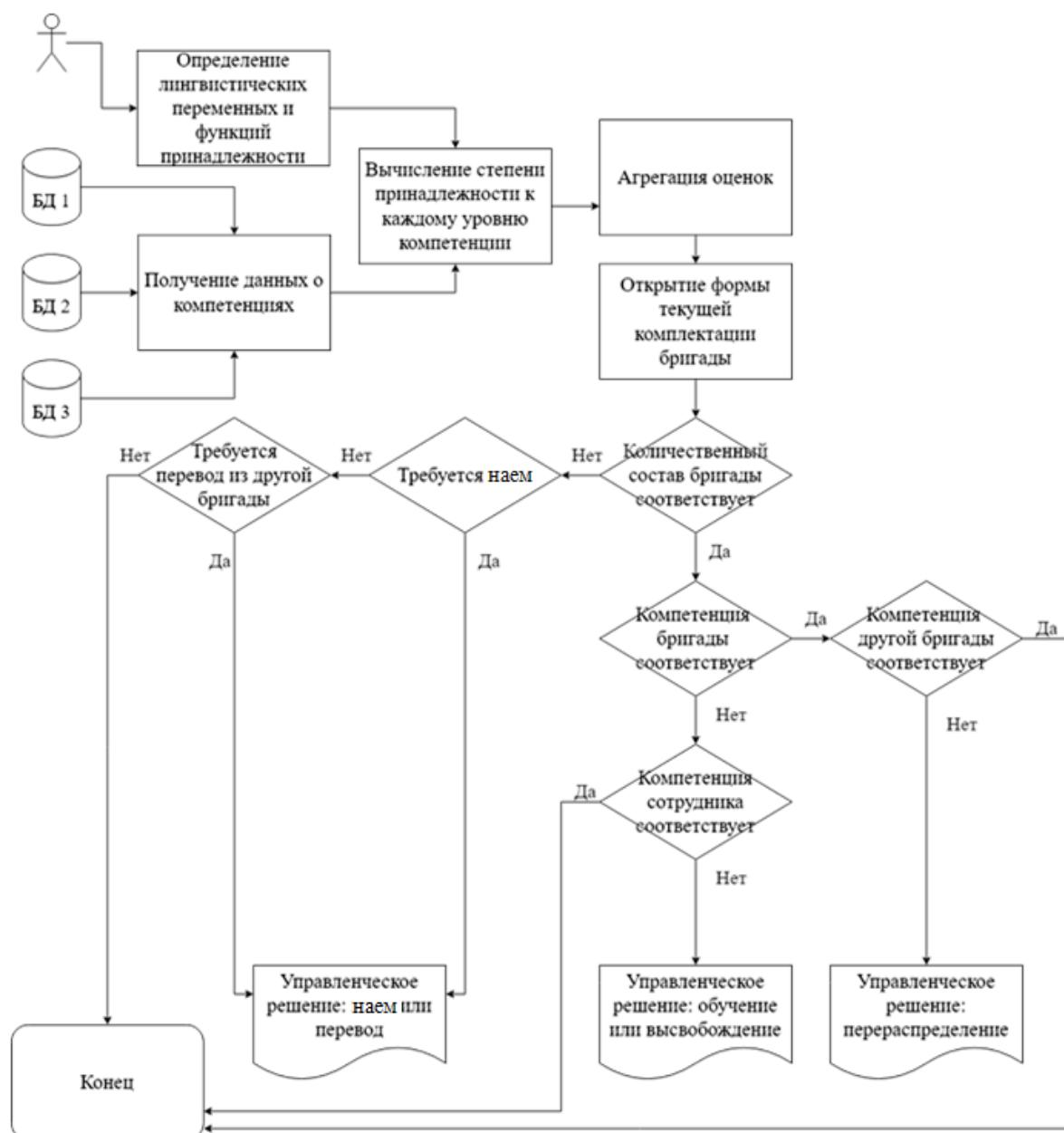


Рис. 3. Алгоритм поддержки принятия решений со встроенной моделью оценки компетенций

Интеграция предлагаемой модели в алгоритм поддержки принятия решений позволит создать эффективный информационно-аналитический инструмент для долгосрочного использования, способный автоматизировать процесс принятия решений на основе теории нечетких множеств. Преимуществами такого инструмента будут являться автоматизация процесса расстановки персонала, объективность решений при выборе сотрудников и способность адаптироваться к изменениям в данных, в том числе об обучении сотрудников.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, интеграция теории нечетких множеств с информационно-аналитическими системами открывает широкие возможности для повышения эффективности управления персоналом. Это позволяет автоматизировать сложные процессы оценки сотрудников и бригад, повышать точность прогнозов и рекомендаций, а также быстрее адаптироваться к изменяющимся условиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьева Д.Р., Гареева Г.А., Басыров Р.Р. Основы нечеткой логики: учебно-методическое пособие. Набережные Челны: НЧИ КФУ, 2018. 42 с.
2. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 165 с.
3. Катаева В.И., Козырев М.С. Методы принятия управленческих решений. М.: Директ-Медиа. 2015. 197 с.
4. Конышева Л.К., Назаров Д.М. Основы теории нечетких множеств: учебное пособие. СПб.: Питер, 2011. 192 с.
5. Блюмин С.Л., Шуйкова И.А. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности. Липецк: ЛЭГИ, 2001. 139 с.
6. Демидов А.В. Методы и модели стратегического управления предприятием в условиях неопределенности внешней среды: на примере предприятий легкой промышленности: дис. ... к. э. н. Москва, 2003. 159 с.

Для цитирования: Торшин С.В., Капитанов А.В. Поддержка принятия управленческих решений в задачах оперативного планирования производственного персонала на основе теории нечетких множеств // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 90–98.

SUPPORT FOR MAKING MANAGEMENT DECISIONS IN THE PROBLEMS OF OPERATIONAL PLANNING OF PRODUCTION STAFF BASED ON THE THEORY OF FUZZY SETS

S.V. TORSHIN, Postgraduate, A.V. KAPITANOV, Dr. Sc

Moscow State University of Technology «STANKIN»,
1, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, e-mail: av.kapitanov@stankin.ru

In rare cases, the management of the process of forming work collectives from among the personnel in industrial enterprises is based on some specific information. Given that the production process requires a high level of professionalism of the staff and rapid adaptation to changes, traditional approaches to assessing the competencies and professional capabilities of

the formed team may be insufficient. Most often, heterogeneous data is required for decision-making. The article provides arguments in favor of the fact that the methodology of the theory of fuzzy sets can be used in solving issues of assessing various qualities of personnel and will allow making rational managerial decisions in the process of staffing. It allows you to take into account uncertainties and subjective factors when assessing the level of knowledge and skills of employees and create more accurate and multidimensional competency models that include both objective indicators and expert assessments. These models can be used in information and analytical management decision support systems for staffing.

Keywords: decision support, recruitment of production personnel, digital competence model, efficiency of the production process, theory of fuzzy sets.

Поступила в редакцию/received: 15.08.2025; после рецензирования/revised: 14.08.2025;
принята/accepted: 28.08.2025

УДК 004.891.3

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-98-106

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ЗАБОЛЕВАНИЙ СЛИЗИСТОЙ ОБОЛОЧКИ ПОЛОСТИ РТА

Г.Б. БУРДО¹, д-р техн. наук, С.Н. ЛЕБЕДЕВ², д-р мед. наук,
Ю.В. ЛЕБЕДЕВА², канд. мед. наук, И.С. ЛЕБЕДЕВ², ординатор

¹ Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: gbtms@yandex.ru

² Тверской государственный медицинский университет,
170100, Тверь, ул. Советская, 4, e-mail: lebedev_s@tvergma.ru

© Бурдо Г.Б., Лебедев С.Н., Лебедева Ю.В., Лебедев И.С., 2025

В статье обобщены результаты работы по созданию интеллектуальных средств поддержки принятия решений для диагностики предраковых заболеваний и опухолей слизистой оболочки полости рта. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения качества оказания первичной медико-санитарной помощи пациентам с такими заболеваниями. Целью работы является анализ разработанных авторами методик поддержки принятия решений при диагностике опухолевых заболеваний слизистой оболочки полости рта с помощью интеллектуальных экспертных систем. Рассмотрены три типа методик создания диагностических интеллектуальных экспертных систем для выявления опухолевых заболеваний слизистой оболочки полости рта: экспертные системы, основанные на весовых коэффициентах, экспертные системы индивидуальной поддержки решений на основе интеллектуальных моделей и экспертные системы коллективной поддержки решений на основе интеллектуальных моделей. В основу разработок положен обобщенный опыт практикующих врачей. Кратко охарактеризованы подходы к разработке экспертных систем.

Ключевые слова: новообразования, слизистая оболочка рта, поддержка принятия решений, экспертные системы, нечеткие множества, искусственный интеллект, производственные модели знаний.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит внедрение средств вычислительной техники в различные сферы человеческой деятельности. В связи с этим открываются принципиально новые возможности использования программных средств в медицине для анализа наборов данных, в качестве систем, минимизирующих ошибки врачей при установлении диагноза [1–3]. Важность систем поддержки принятия решений в медицине особенно важна для врачей, не имеющих достаточного опыта работы и сомневающихся в диагнозе.

Автоматизированные системы с элементами искусственного интеллекта важны и перспективны с точки зрения возможности интеграции компетенций врачей с базами знаний программных средств. В первую очередь это относится к экспертным системам (ЭС) поддержки принятия решений в различных отраслях медицины [3–6].

Широкое распространение получают ЭС, интегрированные в системы информатизации и управления деятельностью медицинских учреждений по профилю стоматологии, челюстно-лицевой хирургии и оториноларингологии [6–9].

Реализация информационных продуктов в медицинских учреждениях выявила наличие ряда проблемных аспектов, сдерживающих широкое применение ЭС в клинической практике. Наиболее существенными из них являются следующие:

попытка сделать врача «придатком» компьютера, что весьма негативно сказывается на качестве диагностики и профессиональном росте врачей;

отсутствие гибкости при обновлении баз знаний;

необходимость наличия у врачей специальных знаний в области вычислительной техники;

высокая стоимость ЭС;

отсутствие возможности переноса ЭС в другую сферу медицины.

Указанные недостатки присущи и тем ЭС, которые предназначены для диагностики предраковых и воспалительных заболеваний слизистой оболочки полости рта и носа.

Можно констатировать, что внедрение данных программных продуктов во врачебную практику актуально и востребовано [2, 3, 8]. В настоящей статье обобщен опыт создания ЭС, не имеющих перечисленных выше недостатков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

У разработчиков ЭС вполне естественным образом возникает желание привлечь к их созданию лучших специалистов в данной области. Эта задача не всегда выполнима в связи с большой занятостью таких специалистов, тем более что взаимодействие с ними должно проходить в режиме прямого контакта. Выходом из этой ситуации является привлечение несколько большего числа экспертов (как правило, 5–7) выше среднего уровня.

Экспертные системы, основанные на весовых коэффициентах

Суть предлагаемых ЭС 1-го типа состоит в том, что результат анализа диагностических признаков представляется суммой их весов в диапазоне от 0 до 1, а далее дается комментарий к оценке. Последовательность создания таких систем описана в [10, 11].

К врачам экспертам, привлекаемым для создания ЭС, должны предъявляться определенные требования [11]. Возможен и более серьезный подбор экспертов, например по методу «Дельфи» [12, 13], но он отличается трудоемкостью и сложностью.

На первом этапе врачами-экспертами на основе изучения врачебных методик и опыта работы все диагностические признаки разбивались на группы. Группы признаков выбирались из соображения их предположительно наибольшего влияния на постановку диагноза.

На втором этапе определялась структура диагностических параметров в каждой группе диагностических признаков.

На третьем этапе рассчитывался вес каждого диагностического параметра во всех диагностических группах как среднее арифметическое значение весов, присваемых данному параметру экспертами, с округлением до сотой. Величины весов путем нормализации приводились к случаю, когда их максимальная возможная сумма по всем четырем группам равнялась единице. Это упрощало результирующую оценку, так как вызывало ассоциацию с вероятностью события, имеющей пределы от 0 до 1.

На четвертом этапе определялись градации вероятности заболевания (комментарий) исходя из суммарных весов имеющихся признаков по всем четырем группам, что показано в табл. 1 на примере диагностики новообразований слизистой оболочки полости рта.

Таблица 1. Градации вероятности заболевания на основании суммарных весов диагностических параметров

Суммарные уровни весов диагностических параметров	Значение суммарное весов	Комментарий к результатам
1	$K \leq 0,39$	Низкий риск. Рекомендуется симптоматическое и/или специализированное лечение у стоматолога и/или повторное обследование через две недели
...
3	$K > 0,49$	Риск наличия злокачественной опухоли / озлокачествления неопухолевого очага полости рта или губы считается высоким, обследуемый нуждается в осмотре врача-онкологом, показана гистологическая верификация (биопсия) из очага поражения и симптоматическое лечение до получения заключения

Работа врача с системой заключается в указании имеющихся параметров с помощью меню. Результаты будут выдаваться в виде соответствующего комментария (см. табл. 1).

Основными достоинствами метода являются:

- 1) понятные параметры диагностики;
- 2) возможность использования врачами неонкологического профиля;
- 3) понятность и простота реализации методики;
- 4) дешевизна разработки;
- 5) удобство модернизации;
- 5) возможность использовать ЭС на любом рабочем месте.

Главный недостаток рассмотренной ЭС – «механический», упрощенный подход к определению весов параметров, не учитывающий возможности интеллектуальных моделей знаний.

Экспертные системы индивидуальной поддержки принятия решений на основе интеллектуальных моделей

Суть предлагаемого метода (ЭС 2-го типа) состоит в том, что на основе продукционной базы данных и нечеткой логики синтезируется интегрированное заключение по диагнозу [14, 15].

На **первом этапе** все диагностические признаки разбивались на группы, состав которых аналогичен предшествующей методике. С учетом того, что группы рассматриваются по отдельности, **на втором этапе** всем группам параметров были присвоены веса, позволяющие привести параметры к единой системе отсчета [14].

На третьем этапе были установлены коэффициенты, характеризующие степень уверенности врачей в диагнозе на основании параметра. Сумма параметров принималась равной единице для удобства приведения всех групп параметров к единой системе отсчета.

Для примера веса параметров в одной из групп приведены в табл. 2.

Таблица 2. Веса параметров жалоб

№	Структура параметров в жалобах пациента	Вес параметра жалобы S_j^i (i – номер параметра в j -й группе)
1	Боль в полости рта при глотании («пустой глоток»)	0,35
2	Ощущение инородного тела в полости рта	0,1
3	Дискомфорт в полости рта	0,1
4	Ощущение жжения языка	0,1
5	Нерезкие болевые ощущения в области региональных лимфатических узлов и их увеличение	0,2
6	Слабость	0,05
7	Боль в сердце	0,05
8	Затрудненное носовое дыхание	0,05

На четвертом этапе выполнялось приведение параметров каждой группы путем введения коэффициента значимости определенной группы параметров $A_j = P_j \times (\sum S_j^i)$, где P_j вес параметров группы.

На пятом этапе формировалась модель [15] позволяющая оценить степень подтверждаемости диагноза и выбора тактики ведения пациента на основе четырех групп параметров диагностики с использованием продукционных баз знаний и теории нечетких множеств [7–16].

Продукционная база знаний имеет вид:

ЕСЛИ значимость первой группы параметров A_1 **И ЕСЛИ** значимость второй группы параметров A_2 **И ЕСЛИ** значимость третьей группы параметров A_3 **И ЕСЛИ** значимость четвертой группы параметров A_4 **ТО** степень уверенности в диагнозе равна B_k (A_j и B_k – лингвистические переменные, имеющие три и пять термов соответственно).

Продукционная база знаний состоит из 71 правила, работа моделей осуществляется в среде MATLAB [17].

Были установлены граничные точки, определяющие степень подтверждённости диагноза на основе взвешенной оценки по аналогии с табл. 2.

Достоинствами методики являются применение привычной медицинской терминологии; возможность использования ее обычным врачом; входные и выходные параметры задаются в удобном для пользователей мнемоническом виде, в диапазоне 0–1.

Экспертные системы коллективной поддержки принятия решений на основе интеллектуальных моделей

Суть методики (ЭС 3-го типа) состоит в том, что лечащий врач договаривается с двумя-тремя врачами – специалистами в данной области об их участии в диагностике [9]. Им рассыпается заполненная лечащим врачом анкета, в которой отображены выявленные им параметры симптоматики. При необходимости уточнения информации назначается онлайн-консилиум с участием пациента.

В последующем врачи, участвующие в диагностике, оценивают степень своей уверенности в наличии заболевания на основании заполненной лечащим врачом формы и результатов консилиума по непрерывной шкале от 0 до 1, где 1 – абсолютно уверен в наличии заболевания, 0 – абсолютно уверен в отсутствии заболевания.

Выполняется расчет по модели взвешенной оценки врачей, и дается ее интерпретация.

На первом этапе создания системы разрабатывалась форма анкеты путем объединения параметров диагностики по всем группам (табл. 3).

Таблица 3. Образец формы анкеты
(на примере заболеваний слизистой оболочки полости рта)

Группа	Показатели на основании жалоб и изучения истории болезни пациента	(да + / нет –)
Группа 1		
1	Боль в полости рта при глотании («пустой глоток»)	–
2	Ощущение инородного тела в полости рта	–
....
7	Боль в сердце	–
8	Затрудненное носовое дыхание	–
Группа 2	Показатели на основе данных осмотра	(да + / нет –)
1	Ощущение боли, зуда, жжения в области патологического очага (очагов)	–
2	Обильное слюнотечение	–
....
8	Поверхность очага (очагов) плотная и / или имеет инфильтрирующее основание	–

Окончание табл. 3

Группа	Показатели на основании жалоб и изучения истории болезни пациента	(да + / нет –)
Группа 3	(да + / нет –)
Группа 4	Показатели на основе анамнестических признаков	(да + / нет –)
1	Существование патологии слизистой оболочки полости рта и губы в течение трех и более месяцев	–
2	Связь появления патологического очага с однократной острой и/или длительной локальной травмой слизистой оболочки полости рта и губы	–
....
6	Стаж курения до 10 лет	–

На втором этапе разрабатывалась продукционная база знаний для определения результирующего мнения врачей, участвующих в консилиуме. Формальная запись подусловий и вывода в продукционной модели имела следующий вид:

ЕСЛИ степень уверенности первого врача A_1 **И** степень уверенности второго врача A_2 **И** степень уверенности третьего врача A_3 **ТО** степень подтвержденности диагноза равна B_j . В данном выражении A_i и B_j являются лингвистическими переменными.

Для лингвистической переменной A_i предложено три терма: низкая, средняя и высокая степень уверенности в диагнозе.

Для лингвистической переменной B_j предложено пять термов (применительно к степени подтвержденности диагноза): весьма низкая, низкая, сомнительная, высокая, весьма высокая. В модели имеется 21 правило.

На третьем этапе определялись граничные точки степени уверенности экспертов и комментарии к ним. В первом приближении можно использовать граничные точки аналогично второй методике.

Достоинство третьей методики заключается в объединении знаний и опыта нескольких врачей (консилиум) и экспертов, участвующих в разработке системы, что повышает точность диагностики. Как положительный момент можно также отметить простоту и удобство работы с системой, не требующей специальных знаний. Кроме того, методика позволяет привлекать к консилиуму врачей дистанционно.

Сравнение параметров экспертных систем

Было установлено, что наибольший интерес для разработчиков и пользователей ЭС имеют такие их параметры, как трудоемкость создания, точность (подтверждаемость) установления диагноза, необходимость наличия дополнительных программных продуктов, длительность процедур установления диагноза (динамика системы), сложность обновления баз данных и баз знаний, необходимость и длительность обучения врачей работе с системой, стоимость создания, область применения, возможность и сложность переноса системы на другую область. В табл. 4 приведен сравнительный анализ трех рассмотренных типов ЭС по данным параметрам. Для удобства часть характеристик представлена в относительном виде, при этом за точку отсчета взята система первого типа. Можно отметить, что описанные типы ЭС обеспечивают потребности основных видов медицинских учреждений, так как не требуют длительного обучения врачей и наличия у них дополнительных знаний в области вычислительной техники.

Таблица 4. Характеристики ЭС различных типов

Сравниваемый параметр	Типы ЭС		
	Тип 1	Тип 2	Тип 3
Трудоемкость создания	1,0	1,6	2,1
Точность (подтверждаемость) установления диагноза (интервал установлен и расширен на основе апробации)	65...70 %	75...85 %	80...90 %
Необходимость наличия дополнительных программных продуктов	Нет	Да	Да
Длительность процедур установления диагноза (динамичность системы)	1,0	1,2	1,2
Сложность обновления баз данных и баз знаний	1,0	2,5	3,0
Необходимость обучения врачей работе с системой	Нет	Нет	Нет
Стоимость создания	1,0	1,9 (2,5*)	2,1 (2,8*)
Область применения	Небольшие медицинские учреждения (поликлиники)	Медучреждения районного типа (средние мед- учреждения)	Средние и крупные медицинские учреждения
Возможность и сложность переноса системы на другую область	Да (1,0)	Да (1,8)	Да (2,2)

* С учетом приобретения дополнительных программных продуктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенные методики создания различных по сложности диагностических ЭС покрывают потребности и соответствуют возможностям большинства медицинских учреждений.

Рассмотренные ЭС можно отнести к системам «дополненной реальности», так как наряду с физическими объектами (пациентами) врач имеет дело с цифровыми данными, представляющими собой виртуальные знания экспертов. Описанные компьютерные системы прошли аprobацию, была продемонстрирована хорошая сходимость результатов.

Дальнейшим направлением указанной работы должна явиться разработка методики актуализации баз знаний, заложенных в указанные ЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александрова О.Ю., Горенков Р.В., Васильева Т.П., Мелерзанов А.В., Дворина О.Г., Решетникова П.И., Якушин Д.М., Якушин М.А., Яроцкий С.Ю., Сошников С.С. Информатизация здравоохранения: от стандартов к экспертным системам // Врач и информационные технологии. 2020. № 2. С. 21–27.

2. Гусев А.В., Плисс М.А., Левин М.Б., Новицкий Р.Э. Тренды и прогнозы развития медицинских информационных систем в России // *Врач и информационные технологии*. 2019. № 2. С. 38–49.
3. Карпов О.Э., Субботин С.А., Шишканов Д.В. Использование медицинских данных для создания систем поддержки принятия врачебных решений // *Врач и информационные технологии*. 2019. № 2. С. 11–18.
4. Боровская Е.В., Давыдова Н.А. Основы искусственного интеллекта: учебное пособие. 4-е изд., электрон. М.: Лаборатория знаний, 2020. 130 с.
5. Карпов О.Э., Андриков Д.А., Максименко В.А., Храмов А.Е. Прозрачный искусственный интеллект для медицины // *Врач и информационные технологии*. 2022. № 2. С. 4–11.
6. Бурдо Г.Б., Семенов Н.А., Лебедев С.Н., Лебедева Ю.В. Интеллектуальная поддержка принятия решений в экспертных системах при диагностике заболеваний полости рта // *Программные продукты и системы*. 2021. Т. 34. № 3. С. 484–488.
7. Портенко Г.М., Портенко Е.Г., Шматов Г.П., Фомина Е.Е. Дифференциальная диагностика форм ринита с применением метода машинного обучения RANDOM FOREST // *Проблемы стандартизации в здравоохранении*. 2024. № 1-2. С. 28–37.
8. Жулев Е.Н., Саакян М.Ю., Вельмакина И.В., Брагина О.М. Особенности ранней диагностики синдрома мышечно-суставной дисфункции височно-нижнечелюстного сустава с помощью экспертной компьютерной системы // *Институт стоматологии*. 2019. Т. 84. № 3. С. 72–74.
9. Портенко Е.Г., Бурдо Г.Б., Кузнецова В.С., Вашневская Н.А. Диагностика хламидийной инфекции при круглогодичном аллергическом рините с использованием медицинских экспертных систем // *Российская оториноларингология*. 2023. Т. 22. № 4 (125). С. 57–67.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019665803 РФ. Экспертная система скрининга онкопатологии ротовой полости «Онкостом-ВОП» / Лебедев С.Н., Лебедев И.С., Лебедева Ю.В. Заявл. 08.11.2019. Дата регистр. и опубл. 28.11.2019. Бюл. № 12.
11. Лебедев С.Н., Давыдов А.Б., Бурдо Г.Б. Основы применения экспертных систем искусственного интеллекта в ранней диагностике карциномы полости рта // *Верхневолжский медицинский журнал*. 2020. Т. 19. № 3. С. 27–29.
12. Hilbert M., Miles I., Othmer J. Foresight tools for participative policy-making in inter-governmental processes in developing countries: Lessons learned from the eLAC Policy Priorities Delphi // *Technological Forecasting and Social Change*. 2009. V. 76. № 7. P. 880–896.
13. Beiderbeck D., Frevel N., von der Gracht H.A., Schmidt S.L., Schweitzer V.M. Preparing, conducting, and analyzing Delphi surveys: Cross-disciplinary practices, new directions, and advancements // *MethodsX*. 2021. V. 8. P. 101401.
14. Бурдо Г.Б., Лебедев С.Н., Лебедев И.С., Лебедева Ю.В. Средства поддержки принятия решений при диагностике новообразований челюстно-лицевой области // *Врач и информационные технологии*. 2022. № 4. С. 40–51.
15. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020620899 РФ. Комплекс производственных правил с алгоритмом работы в экспертной системе ранней диагностики карциномы полости рта / Лебедев С.Н. Заявл. 26.05.2020. Дата регистр. и опубл. 02.06.2020. Бюл. № 6.
16. Гавrilova Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер-пресс, 2016. 162 с.

17. Дьяконов В.П. MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Основы применения. М.: СОЛОН-Пресс, 2008. 800 с.

Для цитирования: Бурдо Г.Б., Лебедев С.Н., Лебедева Ю.В., Лебедев И.С. Опыт применения экспертных систем поддержки принятия решений при диагностике заболеваний слизистой оболочки полости рта // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 98–106.

THE EXPERIENCE OF USING EXPERT DECISION SUPPORT SYSTEMS IN THE DIAGNOSIS OF DISEASES OF THE ORAL MUCOSA

G.B. BURDO¹, Dr. Sc., S.N. LEBEDEV², Dr. Sc.,
Yu.V. LEBEDEVA², Cand. Sc., I.S. LEBEDEV², Resident

¹ Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: gbtms@yandex.ru
² Tver State Medical University,
4, Sovetskaya str., Tver, 170100, e-mail: lebedev_s@tvergma.ru

The article summarizes the results of work on the creation of intelligent decision support tools for the diagnosis of precancerous diseases and tumors of the oral mucosa. The relevance of the study is due to the need to improve the quality of primary health care for patients with tumor diseases of the oral mucosa. The purpose of the work was to create an analysis of decision support methods developed by the authors in the diagnosis of tumor diseases of the oral mucosa using intelligent expert systems. The purpose of the work was to analyze three types (expert systems based on weighting coefficients, expert systems of individual decision support based on intelligent models, expert systems of collective decision support based on intelligent models) of developed methods for creating diagnostic intelligent expert systems for the detection of tumor diseases of the oral mucosa, based on the generalization of the experience of practicing physicians. The approaches to the development of expert systems are briefly described.

Keywords: neoplasms, oral mucosa, decision support, expert systems, fuzzy sets, artificial intelligence, knowledge production models.

Поступила в редакцию/received: 15.08.2025; после рецензирования/revised: 14.08.2025;
принята/accepted: 28.08.2025

НОВОЕ В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ

УДК 621.81(075.8)

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-107-117

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ «ВЕРТИКАЛЬ» КОМПАНИИ «АСКОН»

И.В. ГОРЛОВ, д-р техн. наук, Е.В. ПОЛЕТАЕВА, канд. техн. наук

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

© Горлов И.В., Полетаева Е.В., 2025

Эффективность современного машиностроительного производства в настоящее время зависит от большого количества факторов, одним из которых является система подготовки производства и, в частности, системы автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП). Снижение объемов производства и расширение номенклатуры изделий требуют от автоматизированных систем проектирования технологических процессов гибкости, универсальности, простоты использования, высокого качества проработки и др. Во многом САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ» отвечает современным требованиям. В статье описаны основные возможности САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ». Рассмотрен ряд модулей, обеспечивающих выполнение различных задач в ходе разработки технологических процессов изготовления изделий. Показаны некоторые особенности работы программных модулей данной автоматизированной системы при решении задач в процессе разработки технологического процесса изготовления детали с получением информации в установленном стандартами виде.

Ключевые слова: системы автоматизированного проектирования, автоматизированная разработка технологических процессов, машиностроение.

ВВЕДЕНИЕ

При производстве современной машиностроительной продукции наблюдается тенденция к сокращению объемов и расширению номенклатуры выпускаемых изделий при неизменно высоком уровне их качества, что требует сокращения времени на технологическую подготовку производства с одновременным увеличением глубины ее проработки. Решение этой проблемы невозможно без использования САПР [1–3]. Автоматизация технологической подготовки производства может в несколько раз сократить ее сроки вследствие повышения производительности труда технолога на стадии проектирования с использованием математической логики и специализированных баз данных [4, 5], а также за счет повышения качества реализации решений на стадии доводки технологических процессов [6].

Информационные технологии, используемые в машиностроении при подготовке производства, обеспечивают высокую эффективность и качество работ за счет использования специализированных программных продуктов. Компания «АСКОН» – один из успешных отечественных разработчиков программного обеспечения автоматизированных систем, осуществляющих интеграцию информационных

систем для проектных организаций и предприятий. Преимущество корпорации на современном этапе развития машиностроения – импортонезависимость и опора на отечественные стандарты. Одним из продуктов компании является САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ». Данная система позволяет быстро и с высоким качеством решать широкий круг задач в процессе технологической подготовки производства машино-строительного предприятия, включая:

проектирование технологических процессов;

формирование заказов на проектирование системы технологического обеспечения;

создание управляющих программ для станков с числовым программным управлением;

проведение технологических расчетов;

формирование технологической документации в соответствии со стандартами РФ и стандартами предприятия;

поддержку единого информационного пространства для управления жизненным циклом изделия.

Целью работы является изучение новых возможностей последних версий САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ» компании «АСКОН».

РАБОТА С ПРИЛОЖЕНИЯМИ (МОДУЛЯМИ) САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ» ПРИ СОЗДАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Система «ВЕРТИКАЛЬ» позволяет в автоматизированном цикле разрабатывать единичные, типовые и групповые технологические процессы с использованием широкой номенклатуры технологического оборудования, оснастки, инструментов и многих других технологических объектов. Иерархическая структура данной САПР ТП создает условия для оптимизации процессов технологической подготовки с возможностью параллельного проектирования различных частей трудоемких технологических процессов группой специалистов.

Наряду с технологическими процессами изготовления деталей система «ВЕРТИКАЛЬ» позволяет разрабатывать сложнейшие технологические процессы сборки изделий с использованием специализированных интерфейсов для получения технологических схем сборки, комплектования операций и переходов на основе 3D-моделей сборки (рис. 1).

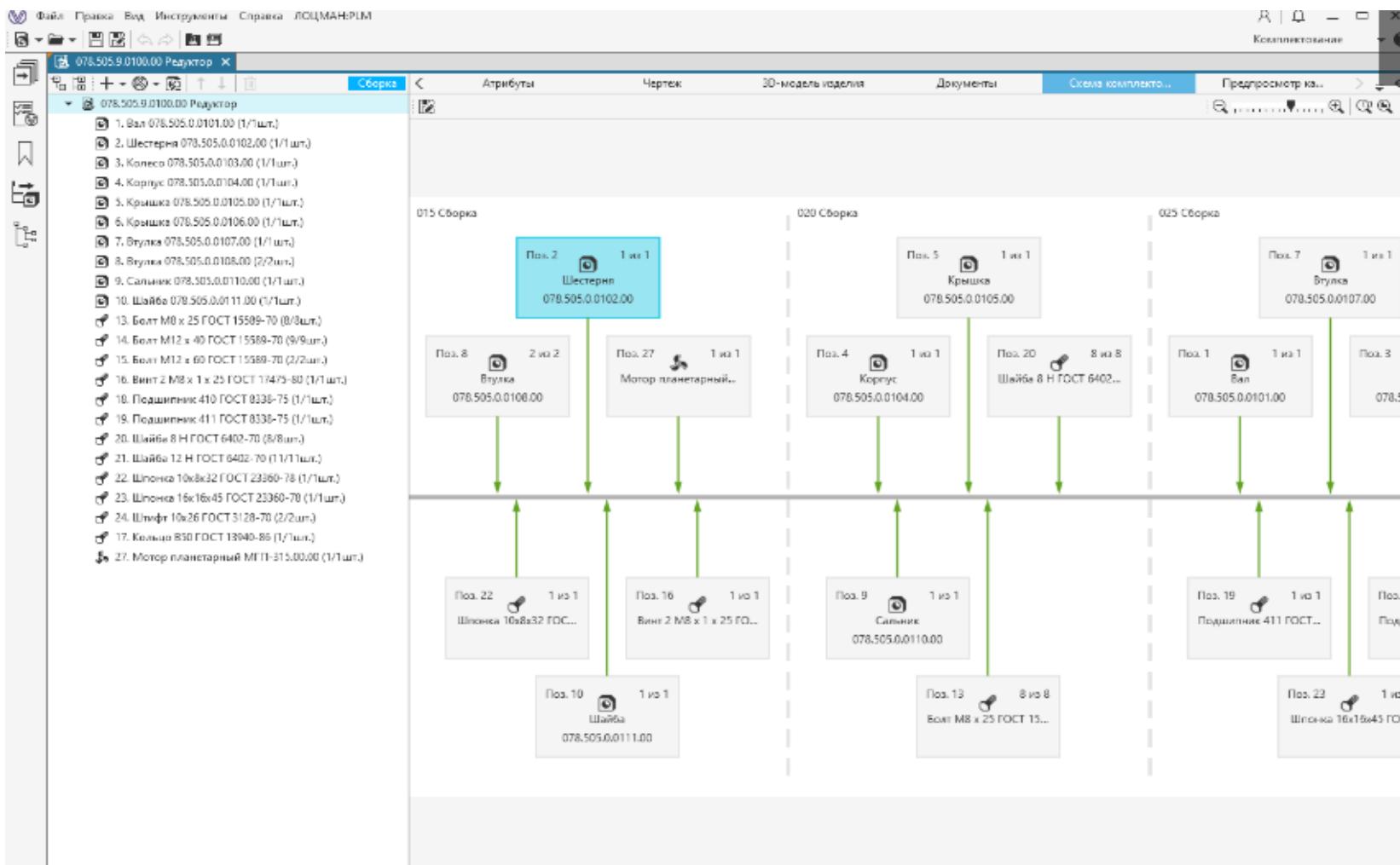


Рис. 1. Схема комплектования операций и переходов сборки в системе «ВЕРТИКАЛЬ»

Ассоциативные связи технологических объектов в данной системе дают возможность сократить количество ошибок при проектировании и обеспечить максимальное совпадение параметров связанных элементов. Например, при изготовлении резьбового отверстия указанного размера система предлагает к выбору сверло нужного диаметра, зенковочный зенкер для фаски и метчик с соответствующими параметрами. Исходя из материала детали и инструмента назначаются нужные режимы резания. Таким образом, с помощью логических связей в системе предотвращаются ошибки при проектировании. Кроме того, в системе реализуются ассоциативные связи с конструкторской документацией (чертежами, 3D-моделями и др.), что позволяет обеспечить двустороннюю связь объектов, и при их изменении на любом из этапов проектирования информация автоматически передается во все разделы документации для исключения ошибок.

При разработке технологического процесса изготовления детали в системе «ВЕРТИКАЛЬ» имеется возможность связывания элементов техпроцесса (например, переход операции) с элементом детали на 3D-модели, что дает наглядное представление о том, какая поверхность обрабатывается на соответствующем переходе. Есть функция, позволяющая получать информацию об элементе детали непосредственно с 3D-модели, если применяется модель с установленными на поверхностях параметрами.

В новых версиях САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ» (начиная с V22) используется *ПОЛИНОМ: MDM* – система управления нормативно-справочными данными, благодаря чему можно работать с технологическими объектами без открытия соответствующего окна системы (рис. 2). Для быстрого поиска нужного элемента техпроцесса его название вносится в строку поиска, система по команде выводит все имеющиеся в базе элементы с таким описанием, и технолог выбирает нужное. Данная система существенно сокращает время поиска требуемого элемента технологического процесса.

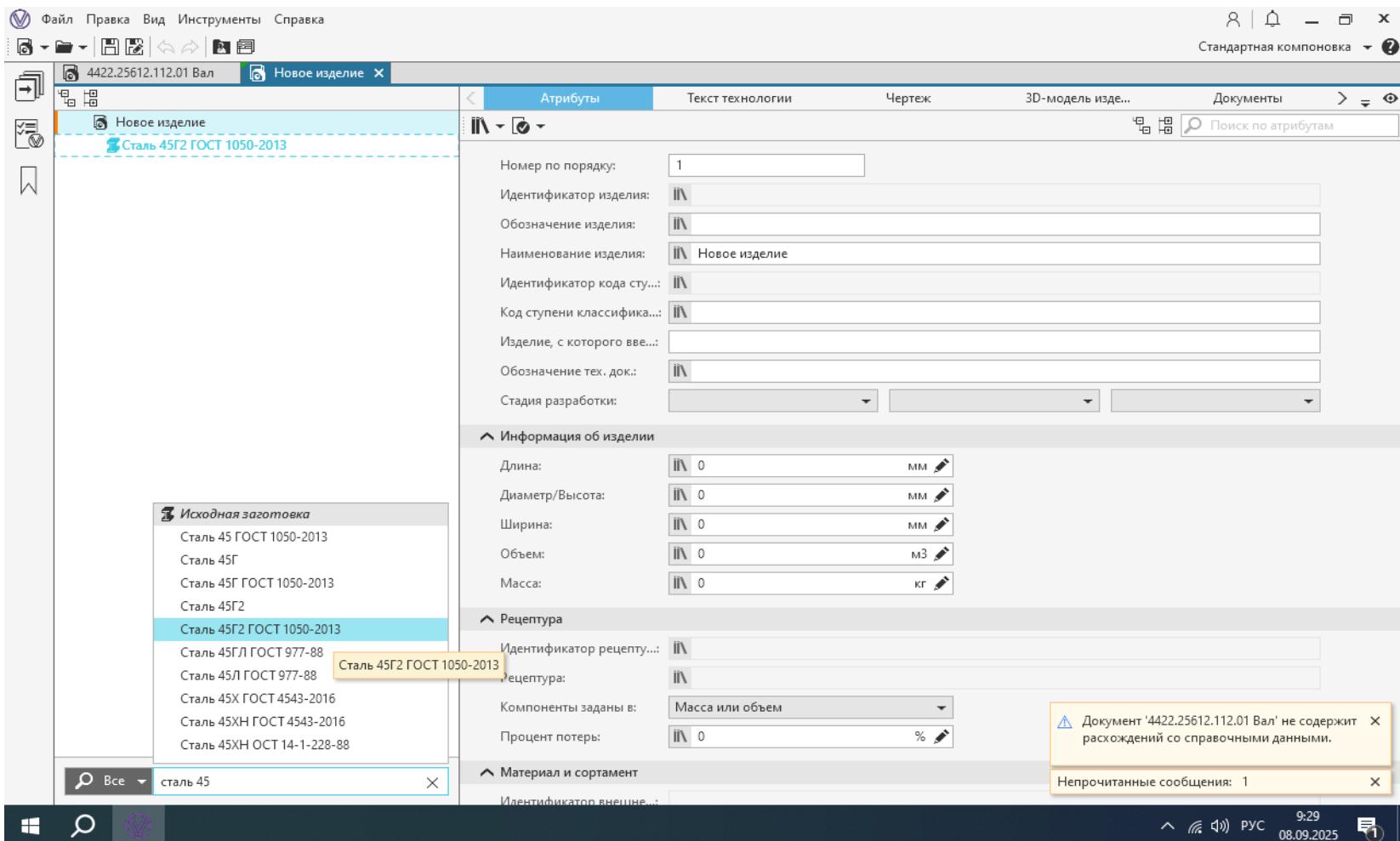


Рис. 2. Окно работы системы управления нормативно-справочными данными *ПОЛИНОМ: MDM*

При разработке технологических процессов часто возникает потребность в использовании специализированного технологического оснащения, которого нет в базе типовых. В этом случае в «ВЕРТИКАЛИ» формируются заявки на проектирование средств технологического оснащения на выбранное оборудование. При этом в системе более высокого уровня *ЛОЦМАН: PLM* осуществляется согласование заявок, сформированных в системе «ВЕРТИКАЛЬ».

Специализированные приложения (модули) позволяют осуществлять расчёты технологических параметров в процессе проектирования.

Модуль *Нормирование трудозатрат* обеспечивает автоматизированный расчет временных затрат на выполнение технологической операции (без определения основного и вспомогательного времени, которое получается при расчете режимов резания). Данный модуль базируется на машиностроительных нормативах для выполнения таких работ, как обработка резанием на различном оборудовании, сборка, сварка, термообработка и т. д.

Модуль *Нормирование материалов* обеспечивает выбор различных материалов и решает задачу выбора заготовки с расчетом ее массы, норм расхода на одну деталь и ряда дополнительных параметров.

Модуль *Расчет режимов резания* в автоматизированном режиме обеспечивает определение режимов обработки для выбранного перехода технологической операции исходя из принятого оборудования, инструмента, материала заготовки, наличия смазочно-охлаждающей жидкости и др., с получением основного и вспомогательного времени, затрачиваемого на выполнение операции (рис. 3).

Модуль *Расчет режима сварки* позволяет в автоматизированном режиме проектировать сварочные операции с получением режимов сварки для выбранных условий (рис. 4).

Модуль *Расчет режима сварки* обеспечивает решение ряда задач:

для типовых видов сварки в автоматизированном цикле определяются основные режимы сварки;

для указанных условий сварки подбираются сварочные материалы;

производится автоматизированный расчет основного времени сварки.

Модуль подготовки технологической документации обеспечивает формирование технологического маршрута, операционных карт, ведомостей и прочих технологических документов, в зависимости от выбранного варианта в соответствии с существующими машиностроительными нормами. При необходимости перед печатью документацию можно просмотреть по запросу пользователя (рис. 5).

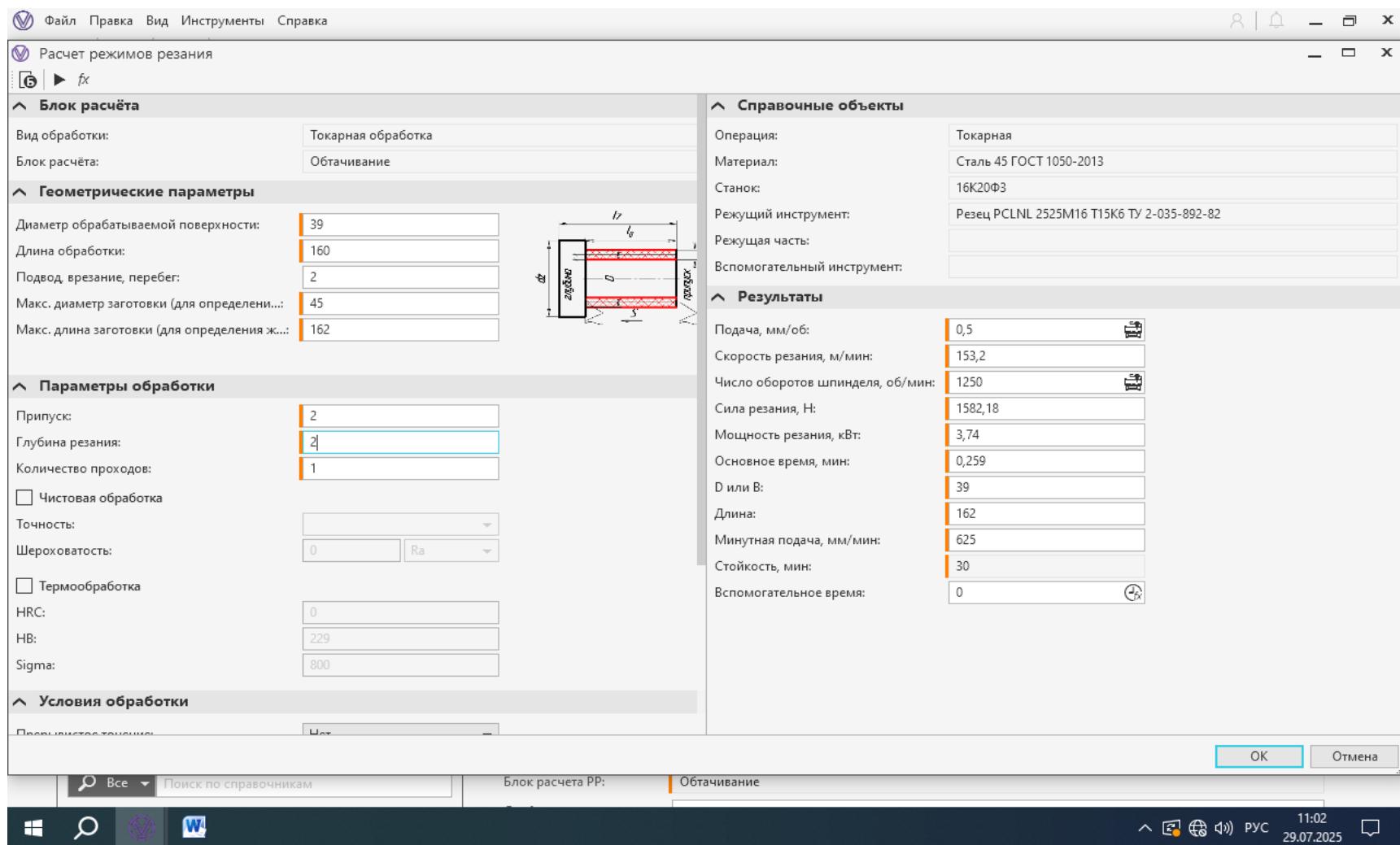


Рис. 3. Окно модуля *Расчет режимов резания* в системе «ВЕРТИКАЛЬ»

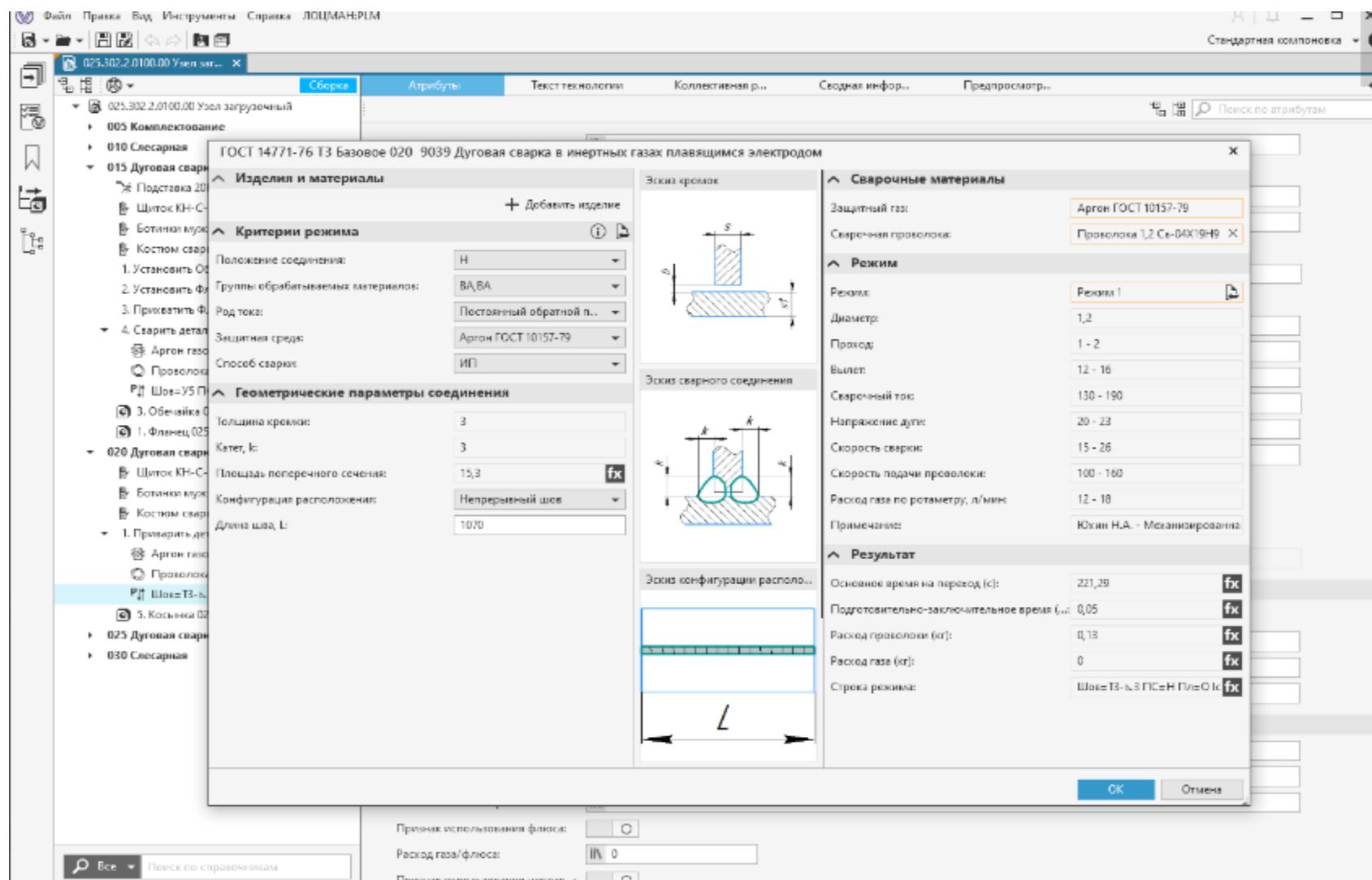


Рис. 4. Окно приложения *Расчет режимов сварки* в системе «ВЕРТИКАЛЬ»

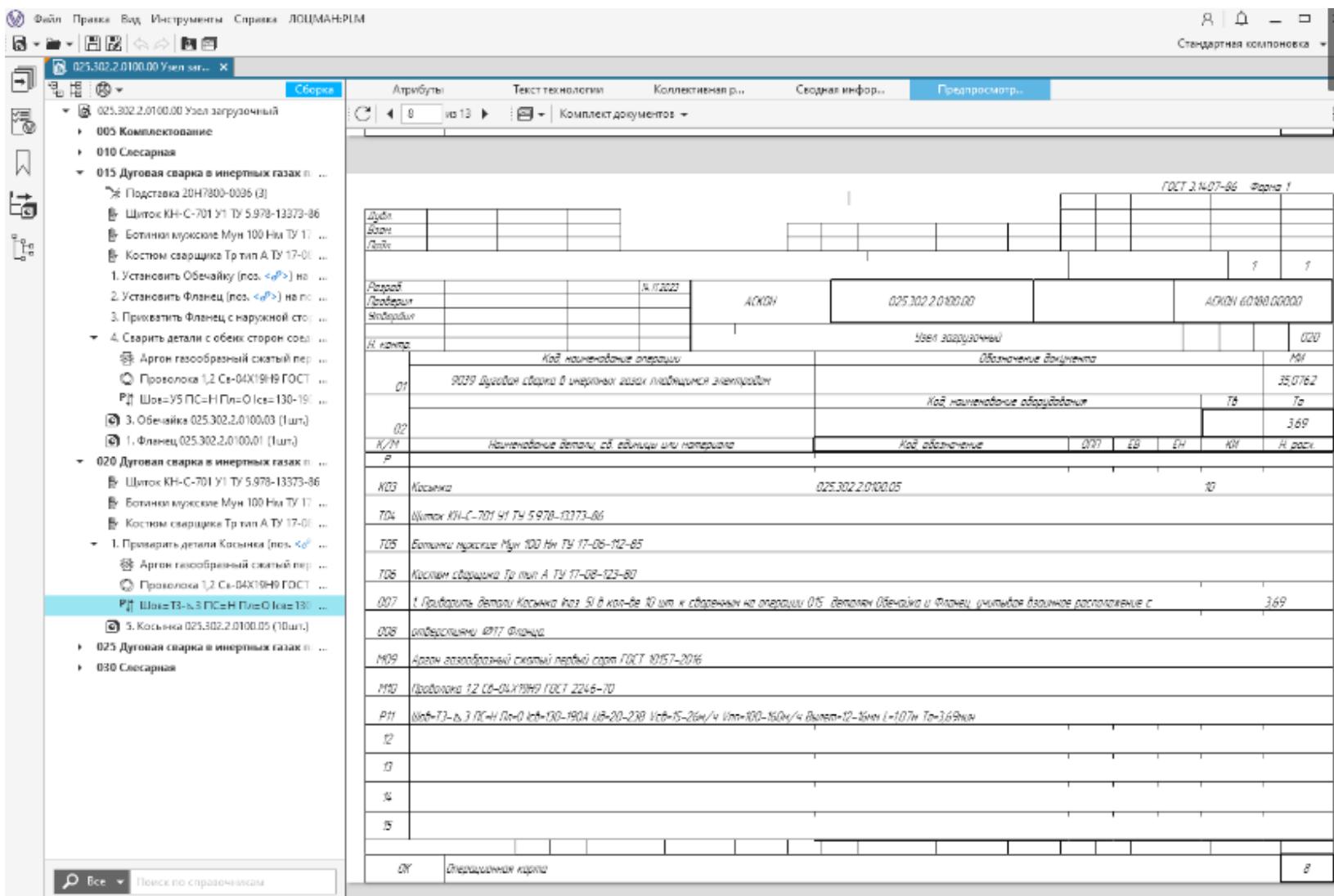


Рис. 5. Вкладка *Предпросмотр карт* в системе «ВЕРТИКАЛЬ»

САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ» входит в разработанную компанией «АСКОН» интегрированную систему подготовки производства, которая обеспечивает не только сквозное проектирование продукции, но и поддержку всего жизненного цикла изделия, а использование информационных технологий при реализации данных задач значительно повышает эффективность этих работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время для решения проблемы повышения эффективности и конкурентоспособности машиностроительного производства необходимо внедрение автоматизированных систем проектирования технологических процессов, основанных на информационных системах поддержки компьютерно-интегрированных производств на всех этапах жизненного цикла изделий – технологиях, использующих передовые наработки в области машиностроения. Эффективная интеграция всех этапов подготовки автоматизированного машиностроительного производства возможна только на основе информационной базы, которая реализуется в единой среде и действует на основе подсистем, отвечающих за решение задач в процессе разработки технологических процессов в машиностроении [7]. САПР ТП «ВЕРТИКАЛЬ» отвечает таким требованиям и обеспечивает автоматизированную разработку технологических процессов на высоком техническом уровне. Развитие отечественных САПР ТП позволит значительно упростить структуру всей информационной системы подготовки производства, избежать дублирования данных, повысить ее эффективность и надежность функционирования.

У корпорации «АСКОН» на сегодняшний день более 16 800 заказчиков в нашей стране и за рубежом. Ее программными продуктами пользуются и предприятия Твери и Тверской области. Следовательно, при подготовке студентов по машиностроительному направлению необходимо осваивать современные САПР ТП, такие как «ВЕРТИКАЛЬ», чтобы молодые специалисты могли с минимальными затратами времени приступить к работе с использованием современных информационных систем, обеспечивая высокую эффективность своего труда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куняев Н.Е., Мартынов Л.М. Подход к совершенствованию управления машиностроительными предприятиями и жизненным циклом их продукции в условиях гиперконкурентной материально-виртуальной бизнес-среды. *Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста: Материалы Всероссийской научно-практической конференции*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. С. 94–99.
2. Лахин О.И., Майоров И.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В. Интеллектуальная система управления жизненным циклом изделий. *Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции*. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 134–138.
3. Попова А.А., Шубин И.Н., Алиев Р.Э. Использование CALS-технологий в машиностроении на примере разработки трехмерных моделей типовых деталей // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2020. Т. 26. № 4. С. 637–649.
4. Алябьева В.Г. Математическая логика. Формальная логика: учебное пособие. Пермь: ПГНИУ, 2021. 109 с.
5. Кириллов В.В., Громов Г.Ю. Введение в реляционные базы данных. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 464 с.

6. Полетаева Е.В., Горлов И.В. Оптимизация структуры производственных систем машиностроительных предприятий // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2020. № 8. С. 22–28.

7. Алексеев Н.С. Основы САПР технологических процессов: учебное пособие. Рубцовск: РИИ АлтГТУ, 2023. 199 с.

Для цитирования: Горлов И.В., Полетаева Е.В. Развитие системы автоматизированного проектирования технологических процессов «ВЕРТИКАЛЬ» компании «АСКОН» // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 107–117.

DEVELOPMENT OF ASCON COMPANY'S CAD/CAM VERTICAL

I.V. GORLOV, Dr. Sc., E.V. POLETAEVA, Cand. Sc.

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

The efficiency of modern mechanical engineering production currently depends on a large number of factors, one of which is the production preparation system, and, in particular, the automated design of technological processes (CAD TP). Reduction in production volumes and expansion of the range of products require from automated systems for designing technological processes flexibility, versatility, ease of use, high quality of development, etc. In many ways, CAD TP Vertical meets modern requirements. The article describes the main capabilities of CAD TP Vertical. A number of modules are considered that ensure the implementation of various tasks in the course of developing technological processes for manufacturing products. Some features of the operation of software modules of this CAD TP in solving problems in the process of developing a technological process for manufacturing a part with the receipt of information in the form established by standards are shown.

Keywords: computer-aided design systems, automated development of technological processes, mechanical engineering.

Поступила в редакцию/received: 01.09.2025; после рецензирования/revised: 12.09.2025;
принята/accepted: 15.09.2025

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 4 (28), 2025**

**Print ISSN 2658-5030
Online ISSN 2687-0029**

Редактор М.Б. Юдина

Корректор С.В. Зорикова

Подписано в печать 19.12.2025

Дата выхода в свет 30.12.2025

Формат 60 х 84/8

Усл. печ. л. 13,72

Бумага писчая

Физ. печ. л. 14,75

Цена свободная

Уч.-изд. л. 12,83

Тираж 500 экз.

Заказ № 51176

С – 118

Редакционно-издательский центр

Тверского государственного технического университета

Адрес издателя: 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22

Отпечатано в ООО «Издательство «Триада»

170034, Тверь, пр. Чайковского, д. 9, офис 514