

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
№ 2 (26), 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:

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

Яблонев А.Л., д.т.н., профессор ТвГТУ

Семенов Н.А., д.т.н., профессор ТвГТУ

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

Члены редакционной коллегии:

По направлению «Машиностроение»

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

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

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

Козырева Л.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

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

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

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

Хопин П.Н., д.т.н., профессор МАИ

По направлению «Недропользование и горные науки»

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

Валиев Н.Г., д.т.н., профессор УГГУ

Горлов И.В., д.т.н., доцент ТвГТУ

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

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

Мисников О.С., д.т.н., доцент ТвГТУ

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

По направлению «Информационные технологии и телекоммуникации»

Бурдо Г.Б., д.т.н., профессор ТвГТУ

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

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

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

Палюх Б.В., д.т.н., профессор ТвГТУ

Шпрехер Д.М., д.т.н., профессор ТулГУ

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

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

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации;

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами;

2.5.3. Трение и износ в машинах;

2.8.8. Геотехнология, горные машины.

© ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Измайлов В.В., Новоселова М.В.</i> О сочетании электроэрозионной и механической износостойкости материалов для коммутирующих электроконтактных соединений.....	5
<i>Архаров А.П.</i> Переустановка детали с резьбовым отверстием на двухшпиндельном токарном модуле.....	13
<i>Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В.</i> Об энергетических параметрах лазерной резки быстрорежущей стали.....	18

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

<i>Андрианова А.А., Яблонев А.Л.</i> Обзор методов комплексного использования выработанных месторождений торфа в сравнении с другими горными породами, добываемыми открытым способом.....	26
<i>Купорова А.В.</i> Положительные аспекты применения гидрофобизации торфомассы при производстве кускового торфа.....	41
<i>Аксенов В.В., Селюков А.В., Пашков Д.А., Герасимов А.В.</i> Необходимость разработки математической модели определения параметров блочного способа разработки карьерных полей.....	51
<i>Лобачева Л.В.</i> Обоснование необходимости и возможности освоения породных отвалов ликвидированных шахт Нелидовского бурого угольного месторождения.....	57

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

<i>Гуляев С.А., Тарачков М.В., Толстель О.В., Ширкин А.Е.</i> Распознавание и оценка расположения объектов при помощи нейронных сетей.....	66
<i>Репин С.В., Тясто С.А.</i> Метод оптимального планирования технологических процессов.....	77
<i>Зорина Е.А., Мешков В.Г., Симанженков М.К.</i> Автоматизированный анализ агрегированных показателей производственного процесса.....	87
<i>Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Маньков М.Б., Осеи-Овусу Р.</i> Модель оптимизации использования аккумуляторных накопителей мощности в системах с распределенной генерацией.....	93
<i>Виноградов Г.П., Кирсанова Н.В.</i> Архитектура киберфизических систем.....	103

CONTENTS

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Izmailov V.V., Novoselova M.V.</i> On the matching of electroerosive and mechanical wear resistance of materials for switching electrical contact connections.....	5
<i>Arkharov A.P.</i> Reinstallation of a part with a threaded hole on a two-spindle turning module.....	13
<i>Izmailov V.V., Afanasieva L.E., Novoselova M.V.</i> On the energy parameters of laser cutting of high-speed steel.....	18

SUBSOIL USE AND MINING SCIENCES

<i>Andrianova A.A., Yablonev A.L.</i> Review of methods of integrated use of mined peat deposits in comparison with other rocks extracted by open mining.....	26
<i>Kuporova A.V.</i> Positive aspects of application of peat mass hydrophobization in sod peat production.....	41
<i>Aksenov V.V., Selyukov A.V., Pashkov D.A., Gerasimov A.V.</i> The need to develop a mathematical model for determining the parameters of the block method of developing career fields.....	51
<i>Lobacheva L.V.</i> Justification of the need and possibility of developing rock dump of the liquidated mines of the Nelidovskoe brown coal deposits.....	57

INFORMATION TECHNOLOGY AND TELECOMMUNICATIONS

<i>Gulyaev S.A., Tarachkov M.V., Tolstel O.V., Shirkin A.E.</i> Recognition and assessment of objects using neural networks using the example of two master's degree projects.....	66
<i>Repin S.V., Tyasto S.A.</i> Technological processes optimal planning method.....	77
<i>Zorina E.A., Meshkov V.G., Simanzhenkov M.K.</i> Automated analysis of aggregated production process indicators.....	87
<i>Korneev K.B., Pavlova Yu.M., Manakov M.B., Osei-Ovusu R.</i> Optimization model for the use of power storage in distributed generation systems.....	93
<i>Vinogradov G.P., Kirsanova N.V.</i> Architecture of cyber-physical systems.....	103

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК620.178

О СОЧЕТАНИИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КОММУТИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

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

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

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2025

Приведены сравнительные экспериментальные данные по электроэрозионной и абразивной износостойкости композиционных материалов на основе меди для коммутирующих электроконтактных устройств с тугоплавкими добавками, изначально предназначенными для повышения электроэрозионной износостойкости материала. В качестве добавок использованы мелкодисперсные технические алмазы, карбиды хрома и вольфрама и их сочетания. Эксперименты выявили значительную степень корреляции характеристик электроэрозионного и абразивного изнашивания исследованных материалов. Показано, что некоторые добавки, повышающие электроэрозионную износостойкость материала, увеличивают его абразивную износостойкость. Сделан вывод, что такие материалы целесообразно использовать для изготовления деталей коммутирующих электроконтактных устройств, конструкция которых предусматривает в процессе коммутации относительное скольжение контакт-деталей.

Ключевые слова: электроконтактные материалы, тугоплавкие добавки, электроэрозионная износостойкость, абразивная износостойкость, корреляция.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-5-12

ВВЕДЕНИЕ

Практически все электроконтактные соединения, характеризующиеся разнообразными конструкциями, назначением и условиями эксплуатации, могут рассматриваться как триботехнические системы, надежность которых в значительной степени определяется процессами контактного взаимодействия поверхностей контакт-деталей, трения и изнашивания. В большей степени эти процессы влияют на надежность скользящих электрических контактов, однако отметим, что и в коммутирующих контактах они играют важную роль. Исключением являются только неразборные соединения (типа сварных или паяных), где отсутствует контакт двух поверхностей как трибологический объект. Задача обеспечения надежности электроконтактных соединений осложняется наличием сочетания механического изнашивания с электроэрозионным, причем каждый из этих видов изнашивания усугубляет негативные последствия другого. Классическим примером электро-контактного соединения, в котором проявляются отрицательные последствия как механического, так и электроэрозионного изнашивания, может служить скользящий электрический контакт токосъемника электрифицированного транспорта с контактным проводом.

Однако в некоторых конструкциях коммутирующих электрических контактов, функция которых – замыкание (размыкание) или переключение электрической цепи, также в течение цикла коммутации возникает скольжение рабочей поверхности одной контакт-детали по другой при одновременном действии прижимающей нагрузки [1, 2]. При этом часть поверхностных пленок, покрывающих рабочие поверхности, разрушается (происходит так называемое самоочищение контактов), что способствует снижению контактного электросопротивления и электроэрозионного износа. В контакте не защищенных пленками металлических поверхностей возможно адгезионное изнашивание. Многократное циклическое нагружение контакт-деталей в процессе коммутации приводит к усталостному изнашиванию. Некоторые исследователи отмечают определенное сходство между электроэрозионным и абразивным изнашиванием [3, 4]: и в том и в другом случае электрический разряд сопровождается возникновением ударной волны, под действием которой в материале контакт-деталей образуются трещины и скалывания.

Тем не менее электроэрозионное изнашивание в коммутирующих контактах в основном преобладает над механическим, поэтому в целях повышения надежности таких контактных соединений принимаются меры по снижению именно электроэрозионного износа.

Одним из ключевых факторов, обуславливающих надежность любого электроконтактного соединения, является выбор оптимального материала контакт-деталей, в том числе с точки зрения электроэрозионной износостойкости. Распространенным электроконтактным материалом является медь (в первую очередь из-за своей высокой электро- и теплопроводности). Для повышения электроэрозионной износостойкости используются композиции на основе меди, содержащие тугоплавкие добавки: вольфрам, молибден, их карбиды, мелкодисперсные алмазы и др. [2, 3, 5]. Имеются отдельные экспериментальные свидетельства о положительном влиянии таких добавок и на трибологические свойства электроконтактных материалов (см., например, [6]), однако в целом этот вопрос изучен недостаточно.

Цель данной работы – исследовать влияние тугоплавких добавок на механическую износостойкость электроконтактных материалов и оценить корреляцию характеристик их механической и электроэрозионной износостойкости.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследованию подвергались образцы шести электроконтактных композиционных материалов на основе меди Cu с добавками тугоплавких компонентов: мелкодисперсных алмазов C с размером зерен 8–12 мкм, карбида хрома Cr_3C_2 и карбида вольфрама W_2C . Состав и характеристики исследованных материалов приведены в табл. 1, в которой П – пористость; НВ – твердость по Бринеллю; ρ – удельное сопротивление. В качестве эталонного материала использована медь Cu (100 %) (медь марки М1, монолит). Композиционные материалы получены компактированием в пресс-форме с последующим спеканием при температурах 850...1 000 °С.

Для оценки электроэрозионной износостойкости электроконтактных материалов использовалась установка, схема рабочего узла которой приведена на рис. 1а. Вольфрамовый электрод 1 диаметром 1 мм, играющий роль эталонного зонда, периодически контактировал с цилиндрическим образцом 2 из исследуемого материала, закрепленным в латунной обойме 3 прижимной пластиной 4 с центральным отверстием.

Обойма закреплена на шпинделе 5, который перемещается микрометрическим винтом, что позволяет регулировать как раствор контактов, так и усилие нажатия в контакте зонда 1 с образцом 2. Частота коммутаций (число циклов замыкание – размыкание) 20 коммутаций в минуту. Раствор контакта равен 7 мм, продолжительность включения – 50 %. Нагрузка на вольфрамовый электрод формировалась за счет разновесов и равнялась во всех экспериментах 0,5 Н. Импульсный разряд в контакте зонда с образцом создавался с помощью емкостного накопителя энергии. Энергия в импульсе 6,5 Дж, величина коммутируемого заряда $Q \approx 66$ мКл.

Таблица 1. Состав и свойства материалов

Материал	П	НВ, МПа	ρ , нОм·м
Cu + C (5 % мас.)	0,12	650	38,7
Cu + C (10 % мас.)	0,15	716	61,3
Cu + C (2 % мас.) + Cr ₃ C ₂ (2 % мас.)	0,15	650	34,9
Cu + C (2 % мас.) + W ₂ C (2 % мас.)	0,13	620	36,2
Cu + Cr ₃ C ₂ (5 % мас.)	0,10	519	26,9
Cu + Cr ₃ C ₂ (10 % мас.)	0,15	620	32,2
Cu (100 %)	0	716	17,6

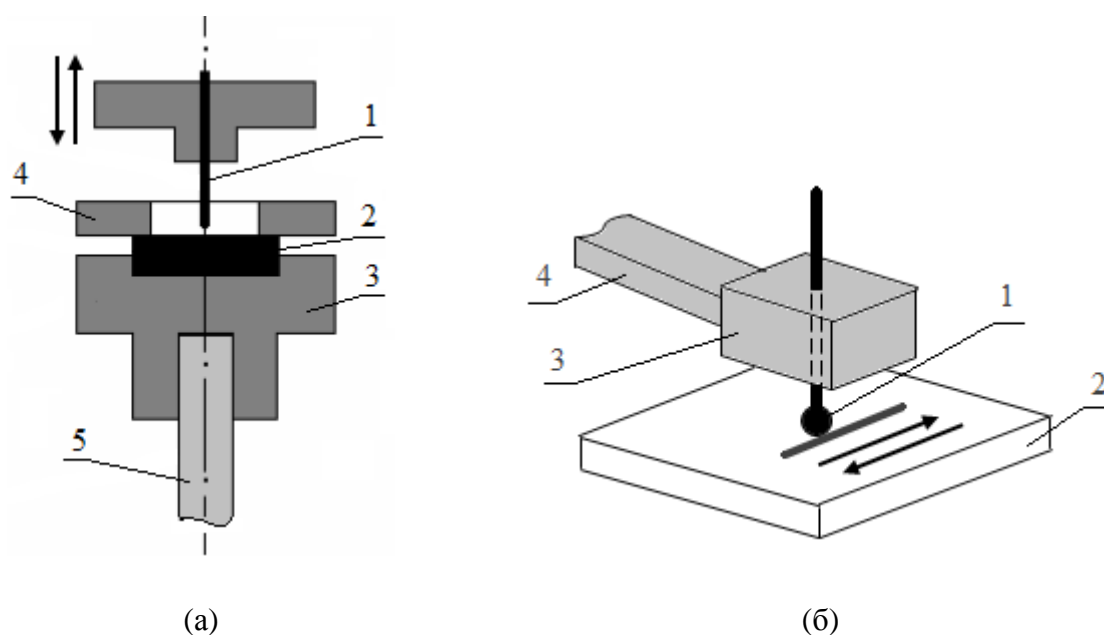


Рис. 1. Схемы установок для испытаний материалов на изнашивание: электроэрозионное (а); механическое (абразивное) (б)

После испытаний измеряли линейный износ образцов, т. е. уменьшение длины вольфрамового зонда и глубину лунки на образце из исследуемого материала. Точность измерений 0,01 мм. В качестве характеристики электроэрозионной износостойкости 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 [7, 8]. В данной работе мы выбрали в качестве характеристики электроэрозионной износостойкости 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 зонда.

Испытания на механическое изнашивание регламентируются целым рядом отечественных и зарубежных стандартов. Кроме того, известно достаточно большое количество нестандартных методик таких испытаний [9]. Для данного исследования оптимальным является метод испытаний на абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы. Согласно ГОСТ 17367-71, цилиндрический образец исследуемого материала трется торцевой поверхностью о плоскую поверхность абразивной бумаги. Недостатк метода – малый диаметр цилиндрического образца (всего 2 мм). От этого недостатка свободна схема испытаний по стандарту *ASTM G 133 “Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear”* («Стандартный метод испытаний на износ при линейном возвратно-поступательном скольжении шара по плоскости»). В этом методе шаровой образец диаметром примерно 9,5 мм совершает возвратно-поступательное скольжение по плоскому образцу с частотой 10 Гц и амплитудой 5 мм. Однако в данном случае ни шаровой, ни плоский образец не содержат абразивные частицы.

Примененный в данной работе метод испытаний материалов на абразивную износостойкость сочетает достоинства двух описанных выше методов. Изнашивание образцов электроконтактного материала проводили о закрепленные абразивные частицы по схеме *шар – плоскость* (см. рис. 1б). 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, осуществлялись с частотой 20 Гц. За один период (цикл) путь трения составлял 5–8 мм. Принимая во внимание возможность так называемого засаливания абразива, когда частицы изнашиваемого материала заполняют пространство между абразивными частицами, вследствие чего скорость изнашивания существенно снижается, была проведена серия предварительных экспериментов в течение различных промежутков времени для выбора продолжительности испытаний. Было установлено, что основной прирост износа происходит примерно в первые тридцать минут, затем скорость изнашивания уменьшается, поэтому длительность испытания была выбрана равной 30 мин.

После испытаний проводили профилометрирование канавок изнашивания. По поперечным профилограммам (перпендикулярно направлению движения шарового контробразца) измеряли глубину канавки изнашивания. Затем рассчитывали характеристики изнашивания исследуемого покрытия. Для описания механической износостойкости использовали стандартные параметры по ГОСТ 27674-88 (линейную I_h и объемную I_v интенсивности изнашивания, среднюю скорость изнашивания u), а также нестандартные: линейный износ за цикл i_h , безразмерный коэффициент износа k и объемную интенсивность изнашивания в расчете на единицу нормальной нагрузки

(размерный коэффициент износа) [10]. Последние два параметра связаны с известным в трибологии уравнением 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 [10], обозначим его I_w .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

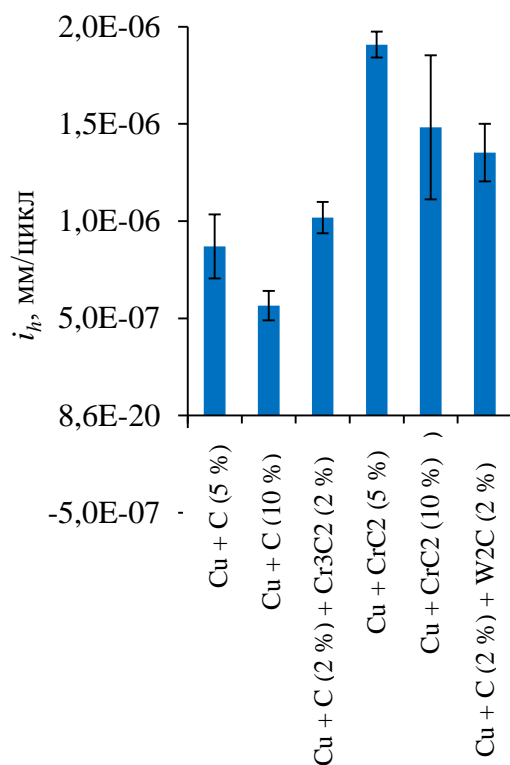
Величины механического и электроэрозионного износа исследованных материалов приведены в табл. 2. Как видно из нее, введенные в электроконтактный материал тугоплавкие добавки, как и ожидалось, существенно повысили его электроэрозионную износостойкость (от 2 до 6 раз). Важно, что некоторые добавки заметно уменьшили также механический (абразивный) износ.

Таблица 2. Величины механического и электроэрозионного износа

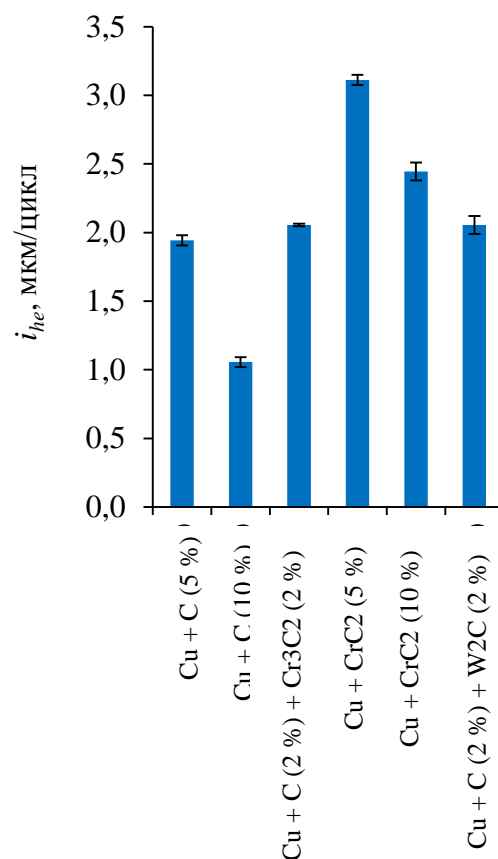
Материал	Механическое изнашивание						Электрич. эрозия i_{he} , мкм/цикл
	$I_h, 10^{-7}$	$I_V, 10^{-14} \text{ м}^2$	$I_w, 10^{-14} \text{ м}^2/\text{Н}$	$u, \text{ мм}^3/\text{ч}$	$i_h, \text{ нм/цикл}$	$k, 10^{-7}$	
Cu + C (5 % мас.)	1,07	3,63	7,25	0,021	0,87	4,71	1,94
Cu + C (10 % мас.)	0,68	2,64	5,28	0,016	0,56	3,78	1,06
Cu + C (2 % мас.) + Cr ₃ C ₂ (2 % мас.)	1,84	4,24	8,49	0,017	1,02	5,52	2,06
Cu + Cr ₃ C ₂ (5 % мас.)	4,03	8,50	17,0	0,029	1,91	8,83	3,11
Cu + Cr ₃ C ₂ (10 % мас.)	2,72	7,10	14,2	0,028	1,48	8,80	2,44
Cu + C (2 % мас.) + W ₂ C (2 % мас.)	1,93	6,05	12,1	0,030	1,35	7,50	2,06
Cu (100 %)	2,50	6,67	13,3	0,026	1,33	9,55	6,72

Визуальное сравнение величин механического и электроэрозионного износа для различных материалов (рис. 2) показывает несомненную корреляцию механической и электроэрозионной износостойкости.

Для уточнения степени этой корреляции были применены непараметрические критерии, а именно коэффициенты ранговой корреляции Спирмена ρ и Кендалла τ [11]. Указанные критерии использованы, во-первых, из-за малого объема выборки, во-вторых, ввиду нетребовательности их к виду функции распределения случайной величины в выборке. Значения коэффициентов ранговой корреляции величин механического и электроэрозионного износа приведены в табл. 3.



(a)



(б)

Рис. 2. Величины износа: механического (а); электроэрозионного (б)

Таблица 3. Коэффициенты ранговой корреляции

Название коэффициента	Зависимые переменные		
	i_h-i_{he}	$k-i_{he}$	I_w-i_{he}
Коэффициент ранговой корреляции Спирмена ρ	0,94	0,92	0,94
Коэффициент ранговой корреляции Кендалла τ	0,89	0,85	0,89

Все коэффициенты корреляции статистически значимы на уровне $p < 0,05$ и соответствуют высокой степени корреляции.

Рис. 3 иллюстрирует корреляцию параметров электроэрозионного и механического изнашивания в абсолютных величинах. Еще более выражена корреляция относительных параметров изнашивания (рис. 4), которые представляют собой отношение абсолютного параметра материала к соответствующему абсолютному параметру монолитной меди (см. табл. 1).

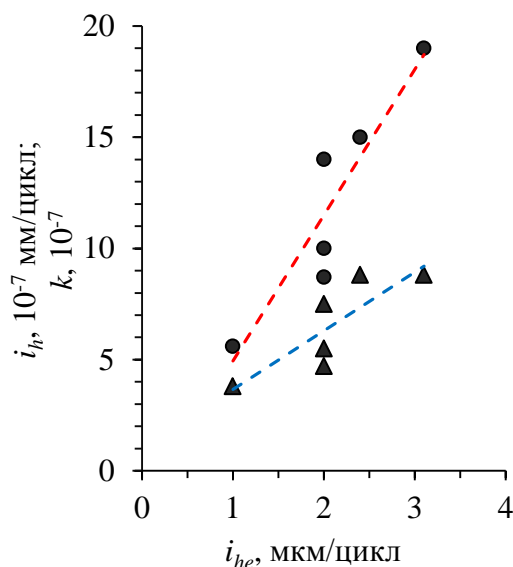


Рис. 3. Корреляция параметров электроэрозионного i_{he} и механического изнашивания:
● – i_h ; ▲ – k

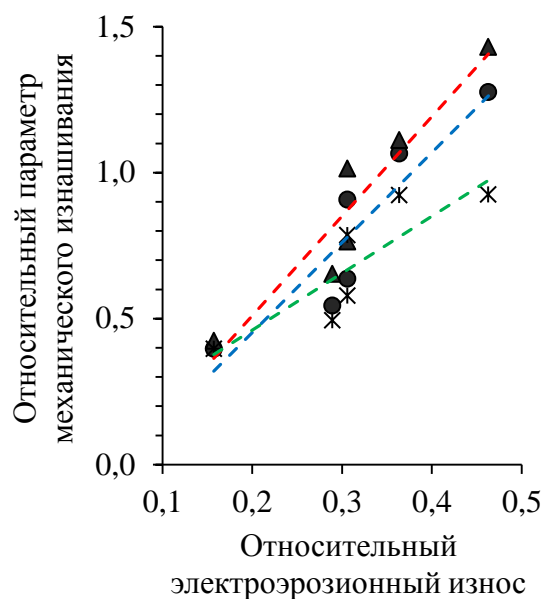


Рис. 4. Корреляция относительных параметров электроэрозионного i_{he}/i_{heCu} и механического изнашивания:
● – I_w / I_{wCu} ; ▲ – i_h / i_{hCu} ; × – k / k_{Cu}

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты показали, что тугоплавкие компоненты, входящие в состав композиционного электроконтактного материала, повышают не только его электроэрозионную износостойкость, но в определенных случаях и механическую (в частности, абразивную). Между параметрами износостойкости в электроэрозионном и абразивном изнашивании выявлена высокая степень корреляции. Результаты данного исследования дают возможность заключить, что в коммутирующих (разрывных) электроконтактных соединениях, где конструкция предусматривает относительное скольжение контакт-деталей, благодаря выбору оптимального материала можно обеспечить сочетание требуемой электроэрозионной и механической износостойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по расчету и конструированию контактных частей сильноточных электрических аппаратов / Н.М. Адоньев, В.В. Афанасьев, В.В. Борисов Н.Н. Дзекцер, В.В. Измайлов, Л.Н. Карпенко, И.П. Мирошников, А.М. Сегаль, В.Н. Федоров, Ю.А. Филиппов, Ю.А. Фоминых, Э.Н. Якунин; под ред. В.В. Афанасьева. Л.: Энергоатомиздат, 1988. 381 с.
2. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. 560 с.
3. Берент В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. М.: Интекст, 2005. 408 с.
4. Берент В.Я. Сильноточный скользящий контакт (свойства, повреждаемость и процессы, протекающие в нем). Ногинск: Аналитика Родис, 2016. 330 с.
5. Иванов В.В. Физико-химические основы технологии и материаловедение порошковых электроконтактных композитов: учебное пособие. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2002. 234 с.

6. Московский С.В., Почетуха В.В., Романов Д.А., Иванов Ю.Ф. Структура и свойства электроэрозионностойких покрытий системы WN-WC-W₂C_{0,84}-Ag, полученных комбинированным методом // *Физическое материаловедение. Актуальные проблемы прочности: Сборник материалов X Международной школы, посвященной 10-летию лаборатории «Физика прочности и интеллектуальные диагностические системы» и LXIII Международной конференции* / отв. ред. Д.Л. Мерсон. Тольятти: ТГУ, 2021. С. 222.

7. Буткевич Г.В., Белкин Г.С., Ведешенков Н.А., Жаворонков М.А. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов. М.: Энергия, 1978. 256 с.

8. Намитокоев К.К. Электроэрозионные явления. М.: Энергия, 1978. 456 с.

9. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. М.: Машиностроение, 2008. 384 с.

10. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. М.: Физматлит, 2007. 368 с.

11. Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для студентов вузов, обучающихся по экономическим специальностям. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2010. 551 с.

Для цитирования: Измаилов В.В., Новоселова М.В. О сочетании электроэрозионной и механической износостойкости материалов для коммутирующих электроконтактных соединений // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2025. № 2 (26). С. 5–12.

ON THE MATCHING OF ELECTROEROSIVE AND MECHANICAL WEAR RESISTANCE OF MATERIALS FOR SWITCHING ELECTRICAL CONTACT CONNECTIONS

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

The article presents comparative experimental data on the electrical erosion and abrasive wear resistance of copper-based composite materials for switching electrical contact devices with refractory additives, originally intended to increase the electrical erosion wear resistance of the material. Finely dispersed technical diamonds, chromium and tungsten carbides and their combinations were used as additives. The experiments revealed a high degree of correlation between the characteristics of electrical erosion and abrasive wear for the studied materials. It is shown that some additives that increase the electrical erosion wear resistance of the material simultaneously increase its abrasive wear resistance. It is advantageous to use such materials for the manufacture of parts of switching electrical contact devices, the design of which permits a relative sliding of the contact parts during the switching process.

Keywords: electrical contact materials, refractory additives, electrical erosion wear resistance, abrasive wear resistance, correlation.

Поступила в редакцию/received: 23.01.2025; после рецензирования/revised: 07.02.2025;
принята/accepted: 12.02.2025

ПЕРЕУСТАНОВКА ДЕТАЛИ С РЕЗЬБОВЫМ ОТВЕРСТИЕМ НА ДВУХШПИНДЕЛЬНОМ ТОКАРНОМ МОДУЛЕ

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук

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

© Архаров А.П., 2025

Представлен анализ известных способов и патронов для установки резьбовых деталей при обработке на токарных станках. Отмечена актуальность работы по созданию способа и средства для переустановки заготовки с резьбовым отверстием на двухшпиндельном токарном модуле. Изложена сущность разработанного способа, в котором при перестановке заготовки на контршпиндель станка в качестве базы используют резьбовое отверстие. Раскрыты устройство и принцип действия спроектированного кулачкового патрона с резьбовой упругой втулкой, сопряженной с корпусом патрона, что дает возможность осуществлять осевое перемещение. Приведены сравнительные анализы созданных способа и патрона с аналогичными известными решениями. Отражены оригинальность разработок и достигаемый технический результат.

Ключевые слова: упругая втулка, заготовка, резьбовое отверстие, переустановка, способ, кулачковый патрон, базирование.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-13-18

ВВЕДЕНИЕ

При обработке деталей в виде втулок на токарных двухшпиндельных модулях возникает необходимость автоматической переустановки заготовки с основного шпинделя на контршпиндель. При этом в качестве базы может использоваться либо наружная поверхность заготовки, либо поверхность ее отверстия. Если базой служит наружная цилиндрическая поверхность, то применяют способ [1, 2] и патрон кулачковый самоцентрирующий [3, 4]. В случае использования в качестве основы цилиндрического отверстия применяют технологические средства либо с неизменным характером движения зажимных элементов (цанговый патрон [5] или цанговую оправку [6]), либо с переменным движением [7]. Однако все упомянутые варианты переустановки нельзя использовать для резьбовых деталей, если при их переустановке в качестве базы необходимо применение резьбовой поверхности.

Для переустановки заготовки с базированием по ее наружной резьбовой поверхности задействуют способ [8], в котором применяют кулачковый патрон с упругой резьбовой втулкой [9]. При этом упругую втулку навинчивают на наружную резьбу заготовки, а затем закрепляют заготовку путем давления кулачками на втулку и ее деформирования. Эти средства используют только для закрепления заготовки за ее наружную резьбовую поверхность. Но они неприменимы в случае переустановки, при которой базирование должно быть выполнено по резьбовому отверстию для обеспечения соосности обрабатываемой наружной поверхности относительно упомянутого отверстия. Решению задачи переустановки заготовки и ее базирования по резьбовому отверстию посвящена данная работа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При исследовании применялся структурный анализ используемых на практике, приведенных в научной литературе и в патентной документации методов и средств для переустановки заготовок в виде втулок на технологическом оборудовании. При разработке нового способа и патрона применялся синтез таких элементов, которые в совокупности образуют единое целое, отвечающее поставленной задаче и критерию оригинальности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве основы разработанного способа принят способ переустановки заготовки с наружной резьбой в механизированный патрон [10]. При данном способе (рис. 1) устанавливают и закрепляют деталь 1 с резьбовым отверстием 2 в базирующем элементе 3. Устанавливают самоцентрирующий патрон 4 с кулачками 5 и втулкой 6, содержащей наружную резьбу 7, отверстие 8 и прорези 9, напротив детали 1. При этом кулачки находятся в положении, обеспечивающем возможность взаимодействия их рабочих поверхностей 10 с отверстием 8. Далее приводят патрон 4 во вращение и подводят его к детали. В момент соприкосновения втулки с деталью перемещение втулки прерывают. Продолжающимся перемещением корпуса патрона и его вращением с втулкой обеспечивается совмещение заходов резьбы отверстия и наружной резьбы 7. В момент такого совмещения возобновляется прерванное перемещение втулки 6 и начинается ее ввинчивание в резьбовое отверстие. После сопряжения втулки с деталью по резьбовым поверхностям останавливают вращение патрона с втулкой. При этом перемещение втулки прекращается, а перемещение корпуса патрона 4 с кулачками продолжается. Этим перемещением доводят кулачки до положения, при котором их рабочие поверхности будут располагаться напротив резьбового сопряжения. Затем останавливают перемещение корпуса патрона и открепляют деталь в базирующем элементе. Далее перемещают кулачки в направлении их разведения. При этом путем деформирования втулки за счет давления на нее кулачков и наличия у нее прорезей деталь вначале центрируется на упомянутой втулке, а затем закрепляется в местах давления кулачков. После этого отводят патрон с деталью в исходное положение.

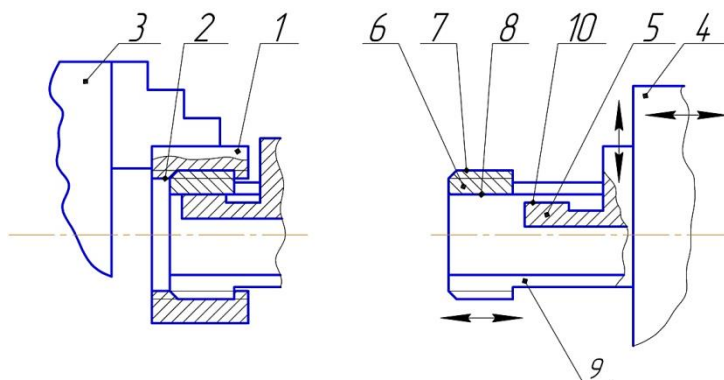


Рис. 1. Схема способа переустановки детали с резьбовым отверстием

Использование патрона, у которого втулка содержит наружную резьбу, а кулачки своими рабочими поверхностями расположены в отверстии втулки, позволяет при переустановке резьбовой детали базировать и закреплять ее за внутреннюю резьбовую поверхность.

Продолжение перемещения патрона с кулачками после остановки перемещения втулки позволяет завести кулачки в зону, ограниченную длиной резьбового сопряже-

ния, и оказывать ими давление на втулку в этой зоне путем разведения кулачков в радиальном направлении.

Таким образом переустанавливают деталь с закреплением ее за резьбовое отверстие.

Для осуществления разработанного способа необходим механизированный патрон, содержащий упругую втулку с наружной резьбой. При этом упомянутая втулка должна быть сопряжена с корпусом патрона, что дает возможность перемещения вдоль оси патрона, а характер этого перемещения должен быть переменным. При разработке такого патрона за основу был взят патрон кулачковый, механизированный для переустановки детали с наружной резьбой [9].

Спроектированный патрон (рис. 2) устроен следующим образом. Он содержит корпус 1 с кулачками 2; коническую втулку 3, размещенную в корпусе с возможностью перемещения вдоль оси патрона от привода 4; механизм 5 передачи перемещения от конической втулки кулачкам; стакан 6 со шпоночной канавкой 7; упругую втулку 8 со ступенчатым отверстием 9, продольными прорезями 10, резьбой 11 и продольными окнами 12; шпонку 13, установленную в конической втулке и сопряженную со шпоночной канавкой; пружину 14, размещенную в выходной части ступенчатого отверстия с возможностью упора одним из своих концов в дно 15 конической втулки, а другим – в уступ 16 ступенчатого отверстия.

Кроме того, упругая втулка установлена выходной частью ступенчатого отверстия на стакане и закреплена на нем. Резьба 11, соответствующая резьбе 17 переустанавливаемой детали 18, выполнена на наружной поверхности упругой втулки. Стакан сопряжен с отверстием конической втулки, что позволяет осуществлять перемещение вдоль оси патрона. Кулачки размещены в продольных окнах, что дает возможность реализовывать их радиальное перемещение и взаимодействие с упругой втулкой в зоне входной части ступенчатого отверстия. Указанные окна выполнены длиной, обеспечивающей возможность осевого перемещения патрона с кулачками при остановившейся упругой втулке после ее ввинчивания в резьбу 17. Кулачки имеют рабочие поверхности 19, 20 и 21.

Патрон работает следующим образом. Его приводят во вращение и перемещают от механизма станка (на рис. 2 не показан) из исходной точки 0 по направлению к закрепленной в элементе 22 детали 18. При касании упругой втулки с упомянутой деталью в точке 1 ее движение вдоль оси патрона прерывают, а вращение вместе с корпусом продолжают за счет сопряжения шпонки со шпоночной канавкой. Продолжают также осевое перемещение корпуса с кулачками за счет подвижного сопряжения стакана с отверстием конической втулки. Благодаря продолжающимся вращению и перемещению корпуса патрона и прижатия упругой втулки к торцу детали 18 пружиной осуществляются совмещение заходов резьб 11 и 17 и ввинчивание упругой втулки 8 в резьбовое отверстие упомянутой детали. В точке 2 останавливают вращение патрона и продольное перемещение втулки при продолжающемся перемещении корпуса с кулачками. Затем прерывают перемещение корпуса с кулачками при достижении рабочими поверхностями 19, 20 и 21 положения, при котором они будут расположены напротив резьбового сопряжения. Открепляют деталь 18 в базирующем элементе 22. Приводом перемещают коническую втулку вдоль оси патрона, которая механизмом разводит кулачки в радиальном направлении. Упомянутые кулачки рабочими поверхностями 19–21 деформируют упругую втулку, которая вначале центрирует деталь 18, устраняя при этом зазор в сопряжении резьб 11 и 17, а затем закрепляет ее в патроне. После этого отводят патрон с деталью в исходное положение. Таким образом осуществляется автоматическая переустановка детали в механизированный патрон с закреплением ее за резьбовое отверстие.

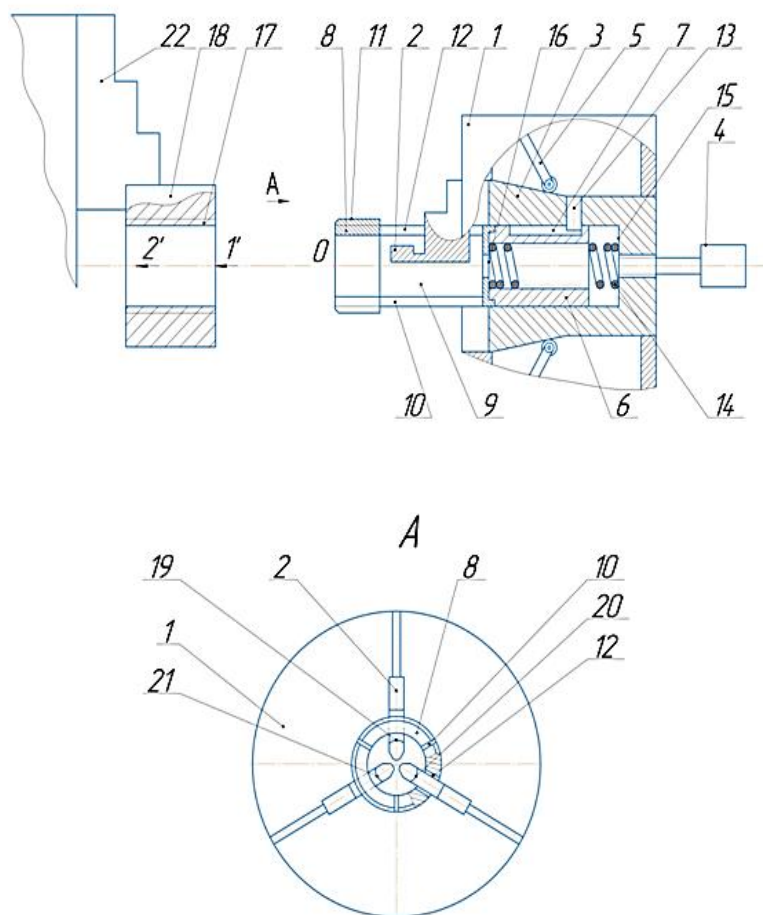


Рис. 2. Патрон кулачковый механизированный для переустановки заготовки с резьбовым отверстием на станке

Сравнение разработанного патрона с известным [9] выявило, что наличие в конструкции разработанного патрона продольных окон и зажимного элемента в виде упругой втулки с резьбой на ее наружной поверхности и расположение кулачков в упомянутых окнах обеспечивают возможность взаимодействия кулачков с поверхностью ступенчатого отверстия во входной его части, а это устраняет непосредственный контакт кулачков с внутренней резьбой переустанавливаемой детали и исключает деформацию упомянутой резьбы при закреплении. Установка упругой втулки на стакане позволяет выполнять ее сменной и закреплять резьбовые детали с разными параметрами внутренней резьбы.

Продольные окна дают возможность корпусу патрона перемещаться вдоль продольной оси патрона при неподвижной упругой втулке и завести кулачки в положение, при котором их рабочие поверхности будут находиться напротив резьбового сопряжения. Тем самым давление кулачков на втулку будет выполняться в месте ее резьбового сопряжения с деталью. Таким образом, сконструированный патрон позволяет при переустановке закреплять деталь за резьбовое отверстие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ используемых способов и патронов для переустановки на технологическом оборудовании заготовок в виде втулок с резьбовым отверстием выявил их достоинства и недостатки. Разработанные способ и патрон позволяют

переустанавливать такие заготовки с закреплением их за резьбовое отверстие. При этом наличие продольных окон в резьбовой втулке дает возможность до переустановки разместить кулачки в ее отверстиях, а при переустановке за счет переменного характера движения упомянутой втулки относительно корпуса патрона вдоль линии центров переместить кулачки в резьбовое отверстие заготовки, сцентрировать и закрепить ее путем деформирования втулки кулачками в зоне резьбового сопряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение-1, 2001. Т. 1. 912 с.
2. Беспалов Б.Л., Глейзер Л.А., Колесов И.М. Технология машиностроения: учебное пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1973. 448 с.
3. ГОСТ 24351-80. Патроны токарные самоцентрирующие трех- и двухкулачковые клиновые и рычажно-клиновые. Основные размеры. URL: <https://inpo-express.ru/company/biblioteka/gost/misc tools1/GOST24351-80.pdf> (дата обращения: 27.02.2025).
4. Кузнецов Ю.И., Маслов А.Р., Байков А.Н. Оснастка для станков с ЧПУ. Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1990. 512 с.
5. Патент РФ 170965. *Автоматический цанговый патрон* // Курилов И.Н., Чуприков А.О., Никитин И.В. Заявл. 29.12.2015. Опубл. 16.05.2017, Бюл. № 14.
6. ГОСТ 31.1066.02-85. Приспособления к металлорежущим станкам. Оправки с разрезными цангами для точных работ. Основные параметры и размеры. М.: Стандартинформ, 2005. 17 с.
7. Архаров А.П. Автоматическая переустановка тонкостенной заготовки на технологическом оборудовании // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 3 (15). С. 45–49.
8. Архаров А.П., Лобанов М.А. Способ переустановки детали с наружной резьбой в механизированный патрон // *Актуальные проблемы машиностроения, безопасности и экологии в природопользовании: Материалы IV Международной научно-технической конференции: в 2 ч.* / отв. ред. Б.Ф. Зюзин. Тверь: ТвГТУ, 2018. Ч. 2. С. 12–15.
9. Патент РФ 2680341. *Патрон кулачковый механизированный* // Архаров А.П. Заявл. 22.02.2018. Опубл. 19.02.2019, Бюл. № 5.
10. Патент РФ 2831796. *Способ переустановки детали с наружной резьбой в механизированный патрон* // Архаров А.П. Заявл. 09.01.2024. Опубл. 16.12.2024, Бюл. № 35.

Для цитирования: Архаров А.П. Переустановка детали с резьбовым отверстием на двухшпиндельном токарном модуле // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 13–18.

REINSTALLATION OF A PART WITH A THREADED HOLE ON A TWO-SPINDLE TURNING MODULE

A.P. ARKHAROV, Cand. Sc.

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

An analysis of known methods and chucks for installing treaded parts during processing on lathes is presented. The relevance of the work on creating a method and means for reinstalling a workpiece with a threaded hole on a two-spindle turning module is noted. The essence of the developed method in which a threaded hole is used as a base when rearranging a workpiece on the machine's counter-spindle is outlined. The structure and operating principle of the designed jaw chuck with a threaded elastic sleeve, coupled with the chuck body with the possibility of axial movement, are disclosed. Comparative analyses of the designed method and the chuck with similar known solutions were carried out. The development originality and the achieved technical result are reflected.

Keywords: elastic sleeve, workpiece, threaded hole, reinstallation, method, jaw chuck, basing.

Поступила в редакцию/received: 21.01.2025; после рецензирования/revised: 03.02.2025;
принята/accepted: 05.02.2025

УДК 621.337.8

ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРАХ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

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

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

© Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., 2025

Проведен анализ энергетических параметров лазерной резки быстрорежущей стали и их влияние на шероховатость поверхности реза. Показано, что при разделении быстрорежущей стали с продувкой азотом возможно получение качества поверхности реза сопоставимое по параметрам шероховатости с такими обработками, как фрезерование или точение. Энергетические затраты при этом сравнимы по величине с резкой низкоуглеродистой стали.

Ключевые слова: лазерная резка, быстрорежущая сталь, энергетические параметры.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-18-25

ВВЕДЕНИЕ

Лазерная резка является одной из передовых технологий обработки материалов. Она отличается высокой точностью и производительностью раскроя; может применяться для разделения металлов, керамики, полимеров, композитов [1]. Современные лазеры способны резать стальные заготовки толщиной до сотен миллиметров на высокой скорости [2]. Лазерное излучение может доставляться на большие расстояния по оптоволокну, что позволяет проводить резку с небольшой головкой даже на расстоянии нескольких десятков или сотен метров от лазерного генератора [2]. Кроме того, узкая ширина реза (1...2 мм), которая связана с количеством вторичных отходов, служит еще одним преимуществом.

Научный и практический интерес к технологии лазерной резки неуклонно возрастает, что подтверждается увеличением во всем мире количества публикаций, посвященных данному направлению исследований [1–9]. На данный момент накоплен значительный опыт и разработаны технологические рекомендации по разделению различных классов материалов с высокой производительностью и качеством [3–17]. Однако из-за сложности и многофакторности данной технологии остается немало нерешенных и непонятых до конца задач. Например, для высоколегированных быстрорежущих сталей вопросы технологической эффективности процесса лазерной резки, качества получаемых поверхностей резов, места этой технологии в изготовлении инструментов разработаны недостаточно [3, 4]

Цель настоящей работы – провести анализ энергетических параметров лазерной резки быстрорежущей стали и их влияния на шероховатость поверхности реза.

МАТЕРИАЛЫ И ПАРАМЕТРЫ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

Для проведения исследований использовали заготовки быстрорежущей стали марки Р6М5 (ГОСТ 19265-73) размером $120 \times 40 \times h$ мм, упрочненные с помощью объемной закалки и трехкратного отпуска при температуре 560 °С. Толщина образцов $h = 3,5...9,5$ мм.

Лазерную резку заготовок выполняли на комплексе BySprint 3015 компании Bystronic.

Параметрами, задаваемыми при лазерной резке, являлись:
мощность лазерного излучения,
скорость резки,
положение фокуса луча относительно поверхности образца,
давление вспомогательного (технологического) газа и толщина разделяемого материала.

Влияние отдельных параметров лазерной резки на микрогеометрию поверхности реза образцов Р6М5 представлено в работе [18]. В исследованиях величина мощности излучения $W = 1,8...4,4$ кВт; скорость резки $v = 0,2...3,0$ м/мин.

Расстояние между фокальной точкой и верхней поверхностью образца выбиралось из интервала 2,7...12,0 мм.

В качестве вспомогательного газа использовался азот, давление которого составляло 0,8...1,4 МПа.

На рис. 1 показаны изображения поверхностей резов быстрорежущей стали, полученные при разных положениях фокальной точки.

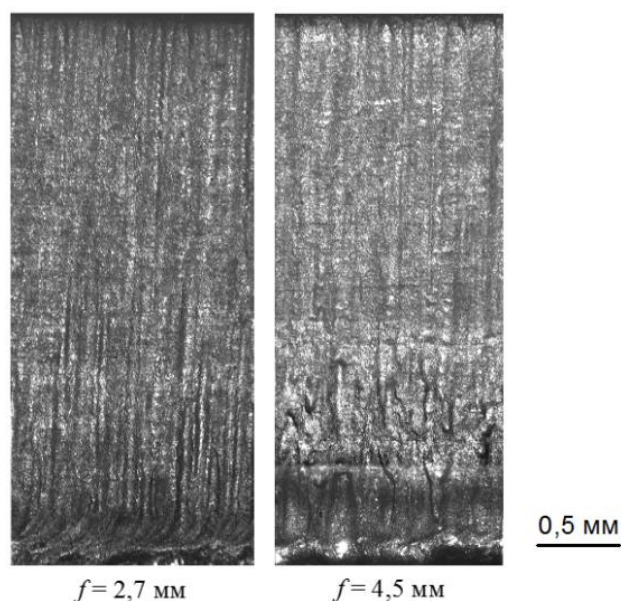


Рис. 1. Внешний вид резов образцов стали марки Р6М5, полученных при разных положениях фокальной точки f от верхней поверхности заготовки

ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ РЕЗА КАК ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

Одним из основных показателей качества лазерной резки материалов служит шероховатость поверхности реза [15–17], которая, в свою очередь, характеризуется стандартными количественными параметрами (ГОСТ Р ИСО 4287-2014, ГОСТ 25142-82, ГОСТ 2789-73). Шероховатость лазерного реза подобна шероховатости поверхностей после таких видов механической обработки, как строгание или фрезерование: довольно грубая, с преобладанием детерминирующей составляющей и ярко выраженным направлением следов обработки (см. рис. 1). Такая шероховатость обычно характеризовалась параметром R_z , который вычислялся как средняя высота пяти элементов профиля (пяти наиболее высоких выступов и пяти наиболее глубоких впадин). Однако все актуальные версии вышеперечисленных стандартов трактуют параметр R_z принципиально иначе (в виде экстремального параметра), а именно как максимальную высоту профиля, равную сумме наибольшей высоты пика профиля и наибольшей глубины впадины профиля в пределах базовой длины. Использование параметра R_z в прежнем значении недопустимо, так как может привести к значительным погрешностям. Тем не менее метрологические средства, которые измеряют прежний параметр R_z , продолжают применяться в некоторых организациях. Кроме того, в технической литературе имеется обширный объем данных по параметрам R_z для различных технических поверхностей. В качестве выхода из сложившейся ситуации мы предложили использовать для данного параметра обозначение R_{10z} в прежнем понимании [18]. К слову, такой параметр введен в новой редакции международного стандарта ISO 21920-2:2021 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters [20] (отечественного гармонизированного стандарта пока нет). Трактуются он именно как средняя высота профиля по десяти точкам (пяти самым высоким выступам и пяти самым глубоким впадинам). Поэтому далее при цитировании литературных данных, в которых приводится параметр R_z в устаревшей трактовке, мы используем для него обозначение R_{10z} .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для характеристики режимов лазерной резки различными авторами предложен ряд размерных и безразмерных параметров, рассмотренных ниже.

В качестве безразмерного энергетического параметра с очевидным физическим смыслом можно рассматривать величину $Q = W / (\lambda \cdot h \cdot \Delta T)$ [5, 6, 11–17] – отношение мощности лазерного излучения к потерям энергии в единицу времени за счет теплопроводности по толщине образца, где λ – теплопроводность разрезаемого материала; h – толщина образца; ΔT – изменение температуры образца от начальной до температуры жидкого металла в зоне реза (плавления). Для стали Р6М5 $\Delta T \approx 1310$ град. Средняя теплопроводность в данном интервале принята $\lambda \approx 30$ Вт/(м · К). В таблице приведены значения параметра Q для исследованных образцов быстрорежущей стали, а также литературные данные для низкоуглеродистой стали. Как видно из нее, при использовании азота в качестве вспомогательного газа возможно получение меньшей шероховатости поверхности реза быстрорежущей стали, чем при резке низкоуглеродистой стали. Энергетические затраты по параметру Q при этом сопоставимы по величине.

Безразмерная мощность лазерной резки Q
и соответствующие параметры шероховатости поверхности реза

Источ- ник	Вспомогат. газ	Сталь	h , мм	Q	W/h , Вт/мм	$R10z$; $R10z/h$
[5, 6]	Кислород	Низко- углеродистая	5–10	1,45–1,78	180–220	–; 0,0017–0,0023
[11]			6–10	1,50–2,21	130–233	23–57 мкм; 0,0036–0,0043
[12]			5	1,6	200	8–10 мкм; –
[17]	Не указан		6–14	1,42–2,2	–	–; 0,0036–0,0043
[15]	Азот		Быстро- режущая	3–5	> 8	–
Авторы		3,5–9,5		11,8–27,6	463–857	6,6–33,8 мкм; 0,0013–0,0059

Следует отметить, что при разделении металлов с продувкой кислородом рез образуется путем удаления расплава с передней стенки струей кислорода. При горении железа выделяется значительное количество теплоты, что ускоряет процесс локального разрушения материала. Появляется возможность резки с меньшими энергетическими параметрами лазерного излучения.

Резка с использованием азота характеризуется отсутствием окисления; ее производительность составляет лишь $\sim 30\%$ от производительности резки с кислородом, поэтому требуется увеличение мощности лазерного излучения в 2...3 раза. Такой технологический газ, как азот, защищает материал, находящийся в зоне обработки, от воздействия кислорода воздуха. Это оказывает положительное влияние на качество поверхности реза, но требуются большие энергетические затраты для разделения материала [19].

Для достижения минимальной шероховатости поверхности реза мощность излучения CO_2 -лазера необходимо увеличивать пропорционально толщине разрезаемого листа из низкоуглеродистой стали [5, 6, 12, 14, 15]. В указанных работах отмечено, что минимальная степень шероховатости поверхности достигается в том случае, если во всем диапазоне толщин остается постоянной величина мощности лазерного излучения в расчете на единицу толщины разрезаемого материала и объема удаляемого материала W/h (см. таблицу). По этому параметру сравнение наших данных с литературными показывает существенно большие энергетические затраты в расчете на единицу толщины материала при резке быстрорежущей стали с продувкой азотом.

Режим лазерной резки можно также характеризовать с помощью параметра W/v , который, в отличие от предыдущего, показывает затраты энергии лазерного излучения в направлении движения лазерного луча в расчете на единицу длины реза [6]. На рис. 2 приведена зависимость величины W/v от толщины образца, соответствующая значениям $R10z$, не превышающим 20 мкм для исследованных образцов различной толщины ($h = 3,3; 3,5; 6,0; 8,0; 9,5$ мм). Данная зависимость хорошо описывается эмпирической формулой $W/v = 4,66 \cdot h^{2,78}$ Дж/мм, где мощность лазерного излучения W взята в ваттах, скорость перемещения лазерного луча v – в миллиметрах в секунду, толщина образца h – в миллиметрах (коэффициент детерминации $R^2 = 0,92$). Как видно, зависимость существенно нелинейная, т. е. увеличение толщины разрезаемого материала требует непропорционально опережающего увеличения расхода энергии.

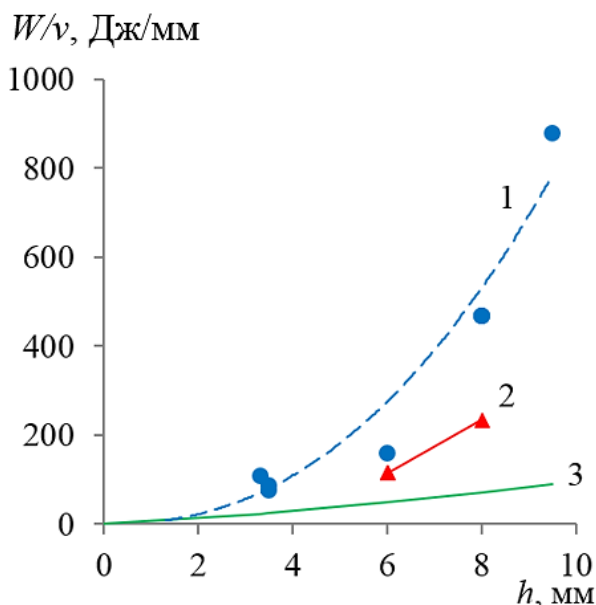


Рис. 2. Затраты энергии лазерного излучения: 1 – быстрорежущая сталь, азот; 2 – образец не разрезался (глубина реза меньше толщины образца); 3 – низкоуглеродистая сталь, кислород, $W/v = 0,35h^2 + 6h$ Дж/мм [6]

Важное значение параметра W/v иллюстрирует линия 2 на рис. 2, построенная согласно режимам лазерной резки, при которых разрезание материала не осуществилось. Для образцов толщиной 6 и 8 мм энергия W/v , равная соответственно 114 и 234 Дж/мм, оказалась недостаточной для разделения материала (глубина реза меньше толщины образца). Уменьшение скорости резки (увеличение затраты энергии на единицу длины реза W/v) привело к разрезанию этих образцов, что можно объяснить повышением плотности мощности излучения в зоне резки.

Плотность мощности в зоне воздействия лазерного излучения на материал – важный фактор, определяющий как характер протекания процесса резки металлов, так и размерные характеристики резов. Этот параметр является комплексной величиной и зависит не только от мощности лазерного излучения, но и от условий его фокусирования. Глубина прорезания и ширина реза обуславливаются положением фокуса относительно поверхности материала. При фокусировке излучения в пятно меньшего диаметра повышается плотность мощности в зоне резки.

Анализ шероховатости образцов (рис. 3, на котором x – расстояние от верхней кромки реза), полученных резкой при различных расстояниях b между фокальной точкой и верхней поверхностью образца, выявил существенную неоднородность распределения величины R_{10z} по глубине. Минимальное и максимальное значения R_{10z} различались почти в 2 раза. Представленные результаты показали, что в этом случае проведение сравнения шероховатости образцов реза в отдельных точках по толщине материала может привести к ошибочным выводам, поэтому необходимо использовать средние по всей высоте реза значения R_{10z} [15].

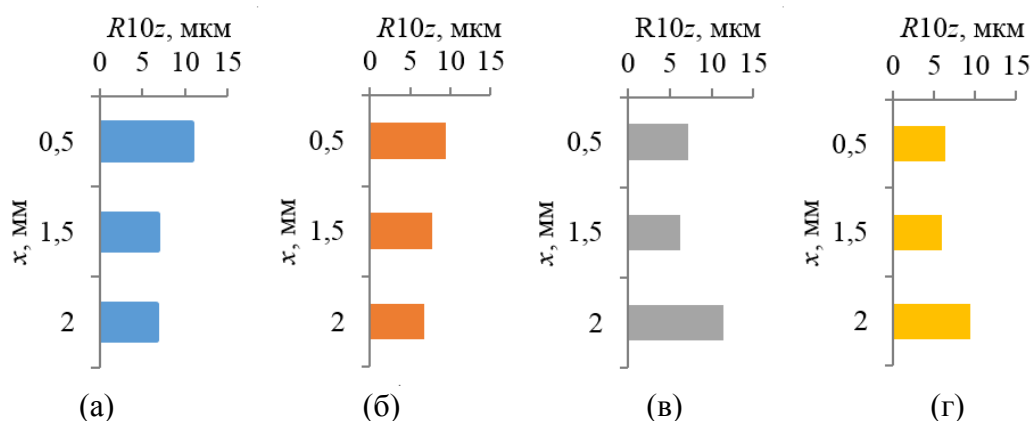


Рис. 3. Изменение шероховатости по толщине образца при разных расстояниях b между фокальной точкой и верхней поверхностью образца: $b = 2,7$ мм (а); $3,1$ мм (б); $3,5$ мм (в); $4,5$ мм (г); толщина образца $h = 3,3$ мм; $W/v = 108$ Дж/мм

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследований было установлено, что энергетические параметры влияют на качество лазерной резки быстрорежущей стали (в частности, на глубину получения качественных резов). Возможно достижение шероховатости R_{10z} менее 10 мкм, что сопоставимо с шероховатостью поверхностей после фрезерования или точения. Использование вспомогательного газа азота способствует эффективной защите поверхности реза от окисления, при этом энергетические затраты по параметру Q близки по величине при разделении низкоуглеродистой и быстрорежущей стали сравнимых толщин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alsaadawy M., Dewidar M., Said A., Maher I., Shehabeldeen T.A. A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. V. 130. № 3. P. 1039–1074.

2. Shin J.S., Song K.H., Oh S.Y., Park S.K. Laser cutting studies on 10–60 mm thick stainless steels with a short focus head for nuclear decommissioning // *Optics & Laser Technology*. 2024. V. 169. P. 110121.

3. Афанасьева Л.Е., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Микротопография и микроструктура поверхности быстрорежущей стали после газолазерной резки // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021. № 5. С. 68–75.

4. Барчуков Д.А., Смолякова И.А., Афанасьева Л.Е. Влияние технологических параметров лазерной резки на размер зоны лазерного воздействия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 4 (24). С. 22–28.

5. Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. О законах подобия газолазерной резки толстых стальных листов // *Доклады академии наук*. 2009. Т. 428. № 3. С. 325–329.

6. Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Экспериментальная оптимизация газолазерной резки толстых стальных листов // *Квантовая электроника*. 2009. Т. 39. № 6. С. 547–551.

7. Базылева И.О., Галушкин М.Г., Голубев В.С., Дубровина Е.А., Карасев В.А. Термические потери в процессе газолазерной резки металлов // *Современные лазерно-информационные и лазерные технологии: Сборник трудов ИПЛИТ РАН* / под ред. В.Я. Панченко и В.С. Голубева. М.: Интерконтакт Наука, 2005. С. 221–227.

8. Голубев В.С. Анализ моделей динамики глубокого проникновения лазерного излучения в материалы // *Современные лазерно-информационные и лазерные технологии: Сборник трудов ИПЛИТ РАН* / под ред. В.Я. Панченко и В.С. Голубева. М.: Интерконтакт Наука, 2005. С. 199–207.

9. Галушкин М.Г., Голубев В.С., Гришаев Р.В. Сравнительный анализ аналитических методов оценки термических потерь для газолазерной резки // *Физика и химия обработки материалов*. 2012. № 1. С. 5–9.

10. Карасев В.А., Голубев В.С., Филиппова Е.О. Термический КПД и эффективный коэффициент поглощения энергии лазерного излучения при газолазерной резке низкоуглеродистой стали в струе азота и воздуха // *Физика и химия обработки материалов*. 2009. № 6. С. 72–77.

11. Минаев И.В., Хонелидзе Д.М., Голышев И.В. Оптимизация технологических параметров газолазерной резки за счет их приведения к безразмерным величинам // *Технологическое образование: достижения, инновации, перспективы: Межвузовский сборник статей*. Тула: ТГПУ им. Л.Н. Толстого, 2015. С. 77–81.

12. Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Энергетические характеристики лазерно-кислородной резки стали излучением CO₂-лазера // *Квантовая электроника*. 2012. Т. 42. № 7. С. 640–644.

13. Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б., Голышев А.А. О законах подобия течения многофазной жидкости в условиях газолазерной резки металлов // *Динамика многофазных сред: Труды XIV Всероссийского семинара, приуроченного к 75-летию академика РАН Фомина В.М.* / под ред. В.М. Фомина, А.В. Федорова. Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 2015. С. 105–108.

14. Голышев А.А., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Оптимальный выбор технологии лазерной резки толстых стальных листов // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2016. № 3 (72). С. 15–22.

15. Фомин В.М., Голышев А.А., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. Механические характеристики высококачественной лазерной резки стали волоконным и CO₂-лазерами // *Прикладная механика и техническая физика*. 2015. Т. 56. № 4 (332). С. 215–225.

16. Голышев А.А. Стандартизация лазерно-кислородной резки по критерию шероховатости поверхности // *Обработка металлов*. 2016. № 1 (70). С. 16–21.

17. Малий Д.В., Медведев П.Н. Влияние шероховатости и теплопроводности обрабатываемой стали на выбор параметров газолазерной резки // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 3 (87). С. 52–61.

18. 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.

19. Kellens K., Rodrigues G.C., Dewulf W., Duflou J.R. Energy and resource efficiency of laser cutting processes // *Physics Procedia*. 2014. V. 56. P. 854–864.

20. ISO 21920-2:2021 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile. Part 2: Terms, definitions and surface texture parameter. URL: <https://www.iso.org/standard/72226.html> (дата обращения: 22.01.2025).

Для цитирования: Измайлов В.В., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В. Об энергетических параметрах лазерной резки быстрорежущей стали // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 18–25.

ON THE ENERGY PARAMETERS OF LASER CUTTING OF HIGH-SPEED STEEL

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

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

The energy parameters of laser cutting of high-speed steel and their influence on the roughness of the cut surface are analyzed. It is shown that when cutting high-speed steel with nitrogen purging, it is possible to obtain a cut surface quality comparable in roughness parameters to such processing as milling or turning. Energy costs are comparable in magnitude with cutting low-carbon steel.

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

Поступила в редакцию/received: 03.02.2025; после рецензирования/revised: 05.02.2025;
принята/accepted: 10.02.2025

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ

УДК 622.3

ОБЗОР МЕТОДОВ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫРАБОТАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТОРФА В СРАВНЕНИИ С ДРУГИМИ ГОРНЫМИ ПОРОДАМИ, ДОБЫВАЕМЫМИ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

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

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

© Андрианова А.А., Яблонев А.Л., 2025

Указано, что открытый способ добычи полезных ископаемых предполагает большие нарушения поверхности земли, а, следовательно, наличие выработанных карьеров после окончания добычи. Отмечено, что поскольку площади этих карьеров весьма значительны, существует проблема по возвращению их в хозяйственную деятельность, которая решается различными путями, в том числе рекультивацией. Перечислены традиционные направления вовлечения выработанных карьеров в хозяйственный оборот (создание сельскохозяйственных угодий, строительство, лесонасаждения, создание прудов, парков, зон отдыха). Сделан вывод: поскольку выработанные торфяные месторождения обладают ярко выраженной спецификой, ограничивающей их введение в хозяйственную деятельность, для них самым актуальным комплексным использованием является создание прудов с последующим зарыблением.

Ключевые слова: выработанное месторождение, полезное ископаемое, комплексное использование, рекультивация, зарыбление, торфяник, хозяйственная деятельность.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-26-40

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших отраслей промышленности РФ является добыча полезных ископаемых (ПИ). Новая эпоха недропользования началась в России во времена Петра I и продолжается до сих пор.

Наиболее важные ПИ можно разделить на три группы:

горючие (нефть, газ, уголь, горючие сланцы, торф);
рудные (железо, алюминий, хром, марганец, титан, вольфрам, медь, цинк, золото, уран);

нерудные (строительные материалы, самоцветы, подземные воды, сырье для химической промышленности, драгоценные камни).

Добыча осуществляется различными способами:

дражным;
гидротехнологическим (скважинным);
подземным, открытым (карьерным) и пр.

Коренные преобразования природных ландшафтов происходят при добыче ПИ открытым способом. Данный вид техногенного воздействия приводит к нарушению вертикальных и горизонтальных связей в ландшафте, в результате возникают разного рода нарушения структуры и функций не только геосистемы, подвергающейся непосредственному преобразованию, но и систем, более или менее отдаленных от нее [1].

Открытый (карьерный) способ – один из самых распространенных в России; он используется, когда недра находятся на небольшой глубине. У этого способа много преимуществ: высокая производительность, возможность работы крупногабаритного оборудования, относительно низкая стоимость разрушения горных пород. Но есть и недостатки, среди которых самый главный – нарушение земной поверхности. Последнее приводит к возникновению ряда экологических проблем: загрязнению воздуха, истощению запасов воды, оползням и т. д.

Главные параметры карьера (разреза) – это совокупность характеристик (например, таких как глубина карьера, ширина карьера по верху, угол откоса бортов карьера, объем вскрыши, производительность карьера, срок службы и т. д.), которые определяют размеры и форму горной выработки, а также основные технологические процессы добычи ПИ открытым способом. Эти параметры играют ключевую роль при проектировании и эксплуатации карьеров.

При планировании разработки относительно однородных пастообразных месторождений ПИ открытым способом, когда земная поверхность представляет собой равнину, задача установления конечной глубины карьера решается аналитическим методом. Для крутых залежей ПИ данная глубина рассчитывается по формуле профессора Б.П. Боголюбова [2]:

$$H_k = \frac{m_{\Gamma} k_{\Gamma} k_{\text{из}}}{ctg\beta_{\text{в}} + ctg\beta_{\text{л}}},$$

где m_{Γ} – горизонтальная мощность залежи полезного ископаемого, м; k_{Γ} – граничный коэффициент вскрыши, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $k_{\text{из}}$ – коэффициент извлечения ПИ из недр; $\beta_{\text{в}}$ – угол откоса нерабочего борта карьера со стороны висячего бока залежи полезного ископаемого, градус; $\beta_{\text{л}}$ – угол откоса нерабочего борта карьера со стороны лежащего бока залежи ПИ, град.

Большое количество месторождений разрабатывается в границах населенных пунктов, что целесообразно с точки зрения производства продукции и поставки строительных материалов. Но возникает много вопросов о правовом статусе отработанных карьеров и их дальнейшем использовании [3]. Решение их зависит от стадии, на которой в данный момент находится карьер, – его жизненного цикла, т. е. совокупной последовательности этапов развития, которые проходит карьер за период своего существования, и которые могут быть изображены в виде схемы (рис. 1).

Для уменьшения отрицательного воздействия на окружающую среду существует комплекс восстановительных преобразований карьера, систематизация и обобщение которых являются целями данной статьи.

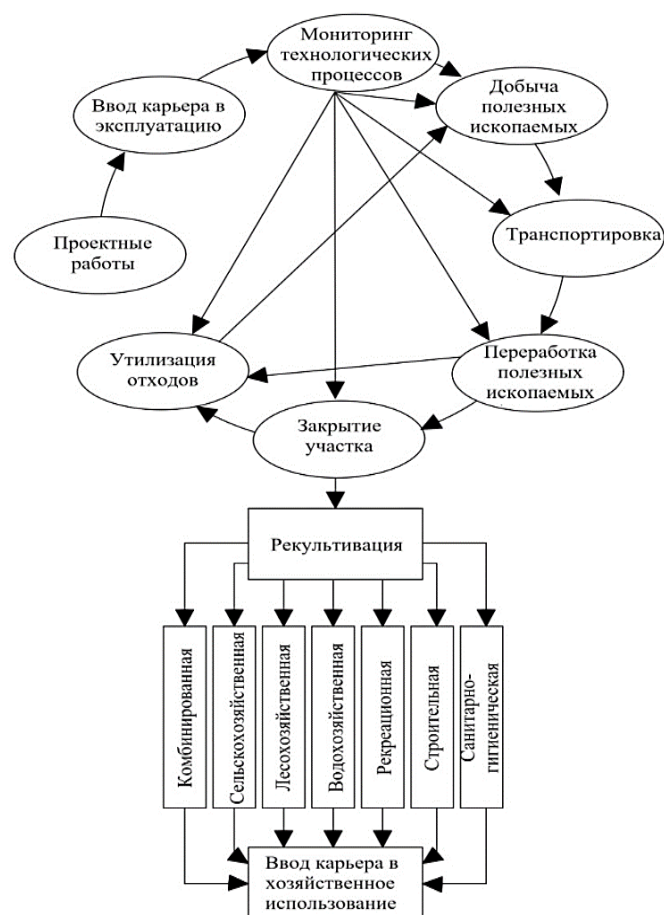


Рис. 1. Жизненный цикл карьера

СПОСОБЫ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫРАБОТАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Все меры и технологические решения, предпринимаемые для минимизации ущерба от главного недостатка открытого способа (разрушения земли), можно сгруппировать по следующим направлениям: уменьшение землеемкости открытых горных работ; восстановление нарушенных земель; создание новых пространственных форм с высокой хозяйственной, эстетической и рекреационной ценностью [4]. Многие горные предприятия еще на стадии разработки карьера включают в проект методы использования карьера после выработки ПИ.

Количество добытых ПИ в РФ в 2023 г., по данным Росстата, показано на рис. 2. Как можно видеть, огромен и объем выработки.

Способов и средств по освоению выработанных площадей недр различных ПИ множество. Один из таких способов – рекультивация. Она представляет собой действия по предотвращению деградации земель и (или) восстановление их плодородия путем приведения земель в состояние, пригодное для их применения в соответствии с целевым назначением и разрешенным использованием, в том числе путем устранения последствий загрязнения почв, восстановления плодородного слоя почвы, создания защитных лесных насаждений [5]. Рекультивация нарушенных земель и земельных участков, как правило, происходит в рамках ключевых направлений реабилитации отработанных земель: сельскохозяйственного, лесохозяйственного, рыбохозяйственного, строительного.

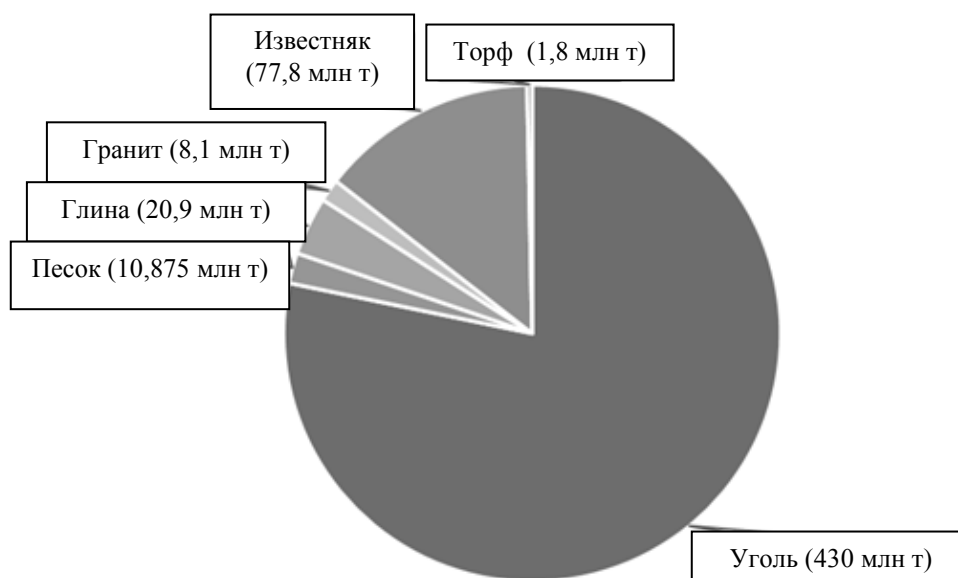


Рис. 2. Уровень добычи ПИ в России в 2023 г.

Существует два основных метода планирования рекультивационных работ: проектирование рекультивации, которое проводится еще до начала добычи ПИ или, по крайней мере, задолго до ее завершения. Этот процесс дает больше возможностей для создания интересных ландшафтов на участках горных работ и минимизации воздействия горных работ на окружающую среду;

составление программы рекультивации после завершения горных работ. Данный подход является самым сложным, дорогостоящим и наименее продуктивным.

Рассмотрим конкретные примеры освоения выработанных площадей различных месторождений горных пород при комплексном их применении.

После завершения добычи песка в карьерах (рис. 3) возникает необходимость рекультивации и дальнейшего использования этих территорий.



Рис. 3. Песчаный карьер [6]

Песчаные карьеры представляют собой значительные площади, требующие особого внимания и подходов к их освоению. Введение выработанных песчаных карьеров в хозяйственную деятельность может включать:

1. Рекультивацию экосистем (основное направление использования выработанных песчаных карьеров). Ее цель состоит в восстановлении природных экосистем и создании условий для устойчивого функционирования биосферы. Эти работы подразумевают удаление мусора (убираются остатки песка, строительных материалов и других отходов, оставшихся после добычи); планирование рельефа (территория выравнивается и формируется таким образом, чтобы соответствовать природному ландшафту); нанесение плодородного слоя почвы (поверхность карьера засыпается слоем указанной почвы, что позволяет растениям прижиться и развиваться); посадку растительности (высаживаются деревья, кустарники и трава, подходящие для данного региона).

2. Создание водоемов. Песчаные карьеры часто становятся идеальными местами для создания искусственных озер. Это возможно, если карьер находится в зоне, характеризующейся наличием естественных подземных вод или если его можно наполнить водой из внешних источников. Водоемы могут использоваться для рекреационных целей (купания, рыбалки, катания на лодках); водоснабжения (озеро может служить источником питьевой воды или применяться для ирригации сельскохозяйственных земель); формирования природных резерватов (водоем может стать местом обитания для птиц и других животных).

3. Строительство и создание инфраструктуры. На месте отработанных песчаных карьеров можно строить различные объекты: жилые комплексы (карьеры могут быть использованы для застройки жильем, особенно если они расположены вблизи городов); промышленные зоны (на территории бывшего карьера можно разместить предприятия, склады, логистические центры); дороги и мосты (карьеры могут стать частью транспортной системы (например, задействоваться для прокладки автомобильных дорог или железнодорожных путей)).

4. Туризм и отдых. Рекультивированные песчаные карьеры могут стать популярными местами туризма и отдыха. Возможные варианты использования – парки и зоны отдыха (подразумевающие в том числе наличие прогулочных дорожек, спортивных площадок); кемпинги и базы отдыха (требуется организация мест для временного проживания туристов); историко-культурные маршруты (если карьер имеет историческую ценность, можно проводить по нему экскурсии, содержать музеи (например, посвященные истории добычи песка)).

5. Сельское хозяйство. После рекультивации карьеров их можно использовать для сельскохозяйственных нужд: земледелия (посева зерновых культур, овощей, фруктов); животноводства (разведения скота, птицы, пчел); лесоводства (т. е. посадки лесов и лесопарков).

6. Энергоэффективные решения. На территории бывших песчаных карьеров можно реализовать проекты, связанные с возобновляемыми источниками энергии, а именно строить солнечные электростанции (установка солнечных панелей осуществляется на ровных площадках карьера); ветряные электростанции (монтаж ветрогенераторов проводится, если местность дает возможность эффективно использовать ветер); геотермальные установки (в них тепло земных недр применяется для генерации электричества или обогрева зданий).

Способы освоения площадей после добычи глины (рис. 4) схожи со способами освоения песчаных карьеров.



Рис. 4. Глиняный карьер [7]

Освоение отработанных глиняных карьеров – сложный процесс, требующий учета многих факторов, таких как тип местности, характер добычи и будущие планы использования земли. Основные способы освоения таких площадей:

1. Рекультивация земель, которая включает подготовку поверхности (удаление остатков горных пород, выравнивание рельефа, создание дренажных систем); почвенное покрытие (нанесение слоя плодородной почвы или почвенных смесей); биологическое освоение (посадку деревьев, кустарников, трав и других растений, подходящих для данной местности).

2. Гидротехнические (если на территории остались карьеры или котлованы, их можно заполнить водой и превратить в искусственные озера или водохранилища. Это позволяет создать новые водные объекты, которые могут применяться с целью орошения, рыболовства, рекреации или водоснабжения).

3. Создание зеленых зон (на территориях, непригодных для сельскохозяйственного использования, можно формировать такие зоны: парки, скверы, лесопарки. Это улучшает экологическую обстановку; к тому же появляется место, где население может проводить свой досуг).

4. Сельскохозяйственное освоение (если почва восстановлена и соответствует агроэкологическим требованиям, можно начать сельскохозяйственное использование территории, а именно выращивание зерновых культур, овощеводство, садоводство, животноводство и т. д.).

5. Строительное освоение (на участках, где почва недостаточно плодородна для сельского хозяйства, но пригодна для строительства, можно организовать застройку (например, возвести жилые дома; организовать промышленную зону, логистический центр; т. п.)).

6. Туристическое освоение (территории, имеющие интересные природные или исторические объекты, используют для прокладывания туристических маршрутов, для организации кемпингов, баз отдыха и других объектов туристической инфраструктуры).

7. Применение в качестве инфраструктурных проектов (на площадях после добычи строят дороги, мосты, линии электропередач, трубопроводы и другие инженерные сооружения. Это позволяет улучшить транспортную доступность и энергетическую систему региона).

8. Экологический мониторинг и управление (важно проводить постоянный мониторинг состояния окружающей среды на рекультивированных территориях. Он включает в себя наблюдение за качеством воздуха, воды, почвы, а также за состоянием растительности и животного мира).

Освоение площадей после добычи глины требует комплексного подхода, состоящего из технических, экологических и социальных аспектов. Выбор конкретного метода зависит от различных факторов, и успешная рекультивация возможна только при соблюдении всех необходимых норм и стандартов.

Способов введения в хозяйственный оборот выработанных рудных карьеров (рис. 5) множество: рекультивация отходами; биологическая рекультивация (например, для создания лесонасаждений); покрытие плодородным слоем почвы; использование для разбивки парка, прокладывания горнолыжных трасс и др.; создание водоемов.

Выработка рудных карьеров также связана с процессом добычи ПИ открытым способом (рис. 5). Существуют различные методы и способы ведения работ в карьерах, которые обуславливаются характеристиками месторождения, глубиной залегания руды, техническими возможностями и экономической целесообразностью.



Рис. 5. Рудный карьер [8]

Использование угольных карьеров после выработки (рис. 6) предполагает следующие восстановительные мероприятия: рекультивацию; применение тепловой энергии отвалов; возвращение пустой породы на место изъятия; создание плацдарма для развития технических средств местной солнечной и ветроэнергетики [9].

Способы использования выработанных известняковых карьеров (рис. 7) также схожи с методами применения песчаных и глиняных выработанных карьеров. В данном случае одно из основных направлений – заполнение водой.

Рекультивация также выступает главным вариантом использования отработанных гранитных карьеров (рис. 8).



Рис. 6. Угольный карьер [10]



Рис. 7. Известняковый карьер [11]



Рис. 8. Гранитный карьер [12]

На рис. 9 приведена сравнительная оценка выработанных площадей недр полезных ископаемых в РФ [13–20].

Поскольку торф располагается ближе к поверхности месторождения, он повсеместно добывается открытым способом, а мощность пласта, как правило, не превышает 2...2,5 м. Уровень его добычи напрямую зависит от введенных в эксплуатацию производственных площадей. Как видно из рис. 9, территории выработанных торфяных месторождений занимают весьма значительную и даже, можно сказать большую часть территории, поэтому проблема комплексного освоения выработанных торфяных месторождений является актуальной и может быть рассмотрена отдельно.

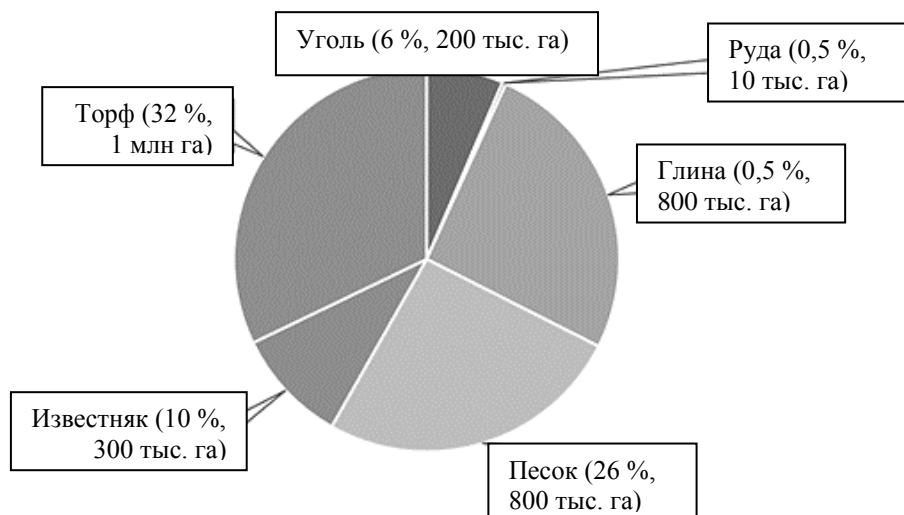


Рис. 9. Сравнительная оценка выработанных площадей недр ПИ в России

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫРАБОТАННЫХ ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Освоение выработанных торфяных площадей – это процесс восстановления и использования земель, на которых ранее добывался торф. В результате добычи образуются карьеры, болота и другие нарушенные территории, которые могут представлять экологическую угрозу и быть непригодными для сельскохозяйственного или иного применения (рис. 10).



Рис. 10. Торфяной карьер [21]

На сегодняшний день рекультивация торфяных карьеров включает в себя затопление без дальнейшего рационального использования. Львиная доля затопленных площадей относится к периоду до 1991 года, когда добыча торфа в России доходила до 175 млн т в год. Поскольку торф сейчас редко применяется в строительстве и как сырье для легкой, химической и медицинской промышленности, его экономическое значение не столь велико, как у таких ресурсов, как нефть, газ или уголь. Однако торф играет важную роль в сельском хозяйстве и энергетике России [22, 23]. Отметим, что изъятие торфа из недр земли порождает значительные экологические последствия. Осушение болот приводит к уменьшению биоразнообразия, изменению гидрологического режима местности и выбросам в атмосферу парниковых газов. В этом смысле воздействие добычи торфа на окружающую среду может быть более весомым, чем добыча некоторых других ПИ.

Торф – возобновляемый ресурс; правда, процесс восстановления занимает сотни лет. В среднем прирост торфа на месторождениях в России оценивается в 250 млн т [24]. Это отличает его от большинства других ПИ, которые являются невозобновляемыми. Осушенные и заброшенные торфяные болота представляют опасность для окружающей среды из-за возникновения торфяных пожаров, причиной которых выступает обычно несоблюдение правил пожарной безопасности. Благоприятным условием для хозяйственного использования выработанных площадей является их размещение в районах с развитой промышленностью и сельским хозяйством. Этим же обстоятельством обусловлена и первоочередная необходимость возвращения выработанных площадей в хозяйственный оборот. Любую рекультивацию выработанных торфяных площадей рекомендуется производить в течение года после окончания работ по добыче торфа.

Существует три принципиальных и традиционных направления применения выработанных торфяных месторождений после рекультивации: создание сельскохозяйственных угодий (при этом толщина защитного, невыработанного слоя торфа составляет не менее 0,5 м); лесоразведение (толщина защитного слоя не менее 0,3 м); создание водоемов и рыбных прудов (толщина защитного слоя не менее 0,15 м) [24–26].

Торфяное месторождение, содержащее экологически полезные ресурсы, представляет интерес для сельского хозяйства, что мы отмечали выше. Для использования выработанных торфяников как сельскохозяйственные угодья необходимо провести рекультивацию первых. Она включает окультуривание почв (добавление грунта – песка или глины); устройство нового дренажа (создание благоприятного водного режима на выработанных площадях) [27]; первичную обработку почвы (сохранение влаги, очищение почвы, регулирование водного баланса); выбор культур для посева (овса, корнеплодов, картофеля, озимой ржи, горохо-овсяной смеси, люпина; при выборе культур следует учитывать, что озимые выращивают только на участках, не затопляемых в половодье); внесение удобрений [28].

Одним из способов рационального применения торфяных месторождений является комплексное использование, т. е. чередование заготовки торфа с возделыванием сельскохозяйственных культур. Такого рода чередование можно осуществлять на всех типах торфяных месторождений: низинном, переходном, смешанном и верховом. При организации указанного использования учитываются особенности осушения и размеры торфяника, природные качества торфа, потребность сельскохозяйственного производства в торфяном сырье и в разных сельскохозяйственных культурах, выращиваемых на данном торфянике. При этом принимаются во внимание специфика организации и планирование во времени и пространстве очередности применения территории торфяного массива. Подбор сельскохозяйственных культур для возделывания на торфяниках при их комплексном использовании производят с учетом

природных свойств торфа, микроклимата и нужды хозяйства в той или иной продукции.

Затопленные карьеры можно использовать для регулирования поверхностного стока, в качестве источников орошения, рыбоводных предприятий, зон отдыха, звероводческих хозяйств и охотничьих угодий [28]. Разведение рыбы в торфяных прудах требует тщательной подготовки и регулярного ухода. Правильный выбор вида рыбы, корректировка химического состава воды и обеспечение достаточного количества кислорода могут обеспечить благоприятные условия для роста и размножения рыбы.

После проведения рекультивации резко улучшается водно-воздушный режим торфяной почвы, благодаря чему усиливается жизнедеятельность микроорганизмов, энергично разлагающих органическое вещество до легкорастворимых, доступных для растений питательных веществ. Минерализация органического вещества торфа обуславливает повышение зольности, удельного веса, заметное уплотнение торфа, уменьшение пористости и влагоемкости. Кальций, освободившийся в результате минерализации органического вещества, снижает гидрологическую кислотность торфа. Эти свойства заметно улучшаются при постоянном возделывании сельскохозяйственных культур.

Комплексное использование торфяных болот требует применения сбалансированного подхода, в рамках которого учитываются интересы экономики, экологии и социальной сферы. Важно находить компромисс между различными видами деятельности, чтобы сохранить уникальные природные ресурсы и обеспечить устойчивое развитие регионов [29].

На выработанных торфяных карьерах возможно строительство (но только на фрезерных полях) малоэтажных населенных пунктов, дачных кооперативов, мини-заводов по производству торфяной продукции и т. п. [30]. В Тверской области есть несколько примеров таких построек: пгт Васильевский Мох (рабочий поселок образовался на территории торфоразработок «Васильевский Мох»); пгт Орша (возник с началом торфоразработок) и пр.

Эффективности рекультивации отработанных торфяников Басьяновского месторождения с целью последующего лесонасаждения посвящена работа [31]. Проведенные мероприятия по технической и биологической рекультивации отработанных торфяников оказались в целом результативными. Успешность рекультивации определялась водным режимом осушенных территорий, который зависит от расстояния между осушительными каналами и их состояния.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБЗОРА, ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Открытый (карьерный) способ является самым распространенным в России. Выработанные месторождения всех горных пород подлежат дальнейшему использованию путем вовлечения в хозяйственную деятельность. Именно в этом заключается комплексность применения месторождений. Рекультивация – один из самых распространенных методов освоения выработанных площадей недр различных ПИ. Торфяные месторождения характеризуются колоссальными размерами площадей выработанных карьеров, из-за чего остро встает вопрос их дальнейшего эффективного использования. Однако выработанные месторождения торфа отличаются от всех остальных карьеров пород ярко выраженной спецификой, которая приводит к возникновению значительных трудностей с применением их в качестве сельскохозяйственных земель, площадей под строительство и разведение лесов.

Торфяники, болота и заболоченные земли редко используются в сельском хозяйстве по нескольким причинам:

1. Из-за физических свойств торфа. Он обладает высокой влагоемкостью и низкой теплопроводностью. Это означает, что данное сырье медленно прогревается

весной и плохо отводит лишнюю влагу. Такие условия затрудняют выращивание многих сельскохозяйственных культур.

2. Высокой кислотности почвы (низкого pH), которая неблагоприятна для выращивания большинства растений. Уменьшение кислотности дает известкование, но данная процедура увеличивает затраты на обработку почвы.

Использование торфяников в строительстве также накладывает некоторые ограничения и порождает определенные сложности, которые делают этот процесс нецелесообразным. К таким сложностям относятся:

1. Низкая несущая способность. Торфяная почва очень мягкая и рыхлая, поэтому не способна выдерживать большие нагрузки без предварительной подготовки. Возведение зданий и сооружений на таких грунтах требует дополнительных мер укрепления основания (например, устройства свайного фундамента), что значительно повышает стоимость проекта.

2. Глубокое залегание твердых пород. Часто под слоем торфа находятся более твердые породы, но они могут залегать на большой глубине. Чтобы добраться до этих пород и обеспечить устойчивость конструкции, приходится выполнять сложные инженерные работы, такие как бурение глубоких скважин, установка длинных свай или полная выемка балластной породы с низкой несущей способностью.

3. Подвижность и консолидация грунта. Торфяные почвы склонны к просадкам и деформациям, особенно после осушения. Это может привести к неравномерному оседанию здания, появлению трещин в фундаменте и стенах, а также другим серьезным повреждениям конструкции. После проведения строительных работ на торфяниках требуется время для стабилизации (консолидации) грунта. Этот период может быть достаточно продолжительным, что задерживает ввод объекта в эксплуатацию.

4. Высокий уровень грунтовых вод. В торфяных почвах обычно высокий уровень грунтовых вод, что создает дополнительные трудности при строительстве. Необходимо предусмотреть эффективные системы дренажа и гидроизоляции, чтобы предотвратить затопление подвальных помещений и разрушение фундамента.

5. Затраты на подготовку территории. Подготовка стройплощадки на торфянике включает в себя осушение, укрепление грунта, устройство фундаментов и т. д. Все это требует значительных финансовых вложений и времени.

Выращивание леса на торфяниках также сопряжено с рядом сложностей и ограничений, поэтому указанные территории редко используются для лесоводства. К таким ограничениям причисляют:

1. Особый состав почвы. Торфяники характеризуются высоким содержанием органического вещества и низким – минеральных элементов, необходимых для роста деревьев. Это ограничивает выбор видов деревьев, которые можно успешно выращивать на таких почвах.

2. Высокий уровень влажности. Постоянное наличие избыточной влаги в почве препятствует нормальному развитию корневой системы деревьев, а именно корни могут гнить, что ведет к ослаблению и гибели растений.

3. Медленный рост культурной растительности и хвойных деревьев. Из-за специфических условий торфяников деревья растут медленнее, чем на других типах почв. Это увеличивает срок окупаемости лесных посадок и снижает экономическую выгоду от их создания.

4. Проблемы с доступом кислорода. В условиях высокого уровня грунтовых вод корни деревьев испытывают недостаток кислорода, что негативно сказывается на их развитии и устойчивости к болезням и вредителям.

5. Сложности с механизацией. Работы по посадке и уходу за лесными культурами на торфяниках затруднены из-за мягкости и подвижности почвы. Использование

тяжелой техники может повредить молодые растения и ухудшить состояние почвы.

Таким образом, наиболее перспективными методами вовлечения выработанных торфяных месторождений в хозяйственную деятельность являются обводнение и зарыбление, представляющие собой природоохранный подход, применение которого помогает возродить природные экосистемы и улучшить экологическое состояние территорий. Причины для данного вывода следующие:

1. Восстанавливаются природные экосистемы. Обводнение торфяников позволяет вернуть им статус естественных болот и озер, что способствует возрождению уникальных экосистем, характерных для конкретных мест. Болота – важная среда обитания для многих видов животных и растений, включая редкие и исчезающие.

2. Улучшается водный баланс. Болотные экосистемы играют ключевую роль в регулировании водного баланса региона: они накапливают и удерживают воду и тем самым предотвращают наводнения во время паводков, обеспечивают стабильное поступление воды в реки и озера в засушливый период.

3. Снижаются риски пожаров. Зарыбленные водоемы на месте бывших торфяников уменьшают вероятность возникновения крупных пожаров, поскольку вода служит естественным барьером для распространения огня. Это особенно важно в районах с повышенной пожароопасностью.

4. Расширяется биоразнообразие. Создание водных объектов на торфяниках привлекает множество видов рыб, птиц и других животных, что способствует увеличению биоразнообразия в регионе. Это также может стимулировать развитие экотуризма и рыболовства.

5. Поглощается углерод. Естественные болота действуют как «углеродные хранилища», забирая и храня большое количество углекислого газа из атмосферы. Таким образом, восстановление болотных экосистем помогает бороться с изменением климата.

6. Проявляется экономическая выгода. Развитие рыболовства и экотуризма на восстановленных торфяниках может приносить доход местным сообществам, так как появляются новые рабочие места и улучшается качество жизни населения.

7. Минимизируется ущерб природе. Обводнение и зарыбление, в отличие от использования торфяников для сельского хозяйства или строительства, минимизируют негативное воздействие на окружающую среду, так как способствуют сохранению природных ресурсов и устойчивому развитию региона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альберг Н.И., Иметхенов А.Б., Шаралдаева В.Д., Оленников И.В. Оценка восстановительных способностей, трансформированных горнодобывающим производством геосистем // *Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления*. 2009. № 2. С. 61–64.

2. Челпанова Е.В., Лукьянец Е.В. Открытые горные работы: учебно-методическое пособие. Пермь: ПНИПУ, 2020. 73 с.

3. Шайхулина М.В. Жизненные циклы карьеров и их правовой статус // *Молодой ученый*. 2019. № 3 (241). С. 62–64.

4. Ильин С.А., Пастихин Д.В. Состояние и перспективы развития открытого способа разработки месторождений полезных ископаемых // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. № S1. С. 364–383.

5. Осинцева М.А., Бурова Н.В., Жидкова Е.А. Особенности рекультивации отработанных территорий угольных разрезов в Кузбассе // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2022. № 9 (123). С. 1–11.

6. Электронный ресурс. URL: <https://avatars.mds.yandex.net/get-altay/5496626/2a0000017db23acea1ac40aa9d72e7431b47/XXL> (дата обращения: 08.11.2024).

7. Электронный ресурс. URL: https://konkurs.trip2rus.ru/sites/default/files/field/images/foto/dsc08423_edited.jpg (дата обращения: 08.11.2024).
8. Электронный ресурс. URL: <https://assets.bwbx.io/images/users/iqjWHBFdfxIU/i2dxVMtzRsQg/v1/1200x800.jpg> (дата обращения: 08.11.2024).
9. Полинов А.А. Обоснование конструкции и параметров откосов отвалов и борта карьера для эффективного использования солнечной и ветровой энергии: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск. 2024. 159 с.
10. Электронный ресурс. URL: https://avatars.dzeninfra.ru/get-zen_doc/1132604/pub_5d634560a98a2a00aef8b427_5d634a8e95aa9f00ad3db1da/scale_1200 (дата обращения: 08.11.2024)
11. Электронный ресурс. URL: https://s0.rbk.ru/v6_top_pics/media/img/4/22/755731329034224.jpg (дата обращения: 17.03.2025)
12. Электронный ресурс. URL: <https://kamengrad.by/wp-content/uploads/2019/12/dobycha-granita-02.jpg> (дата обращения: 18.03.2025).
13. Агенство регионального развития. Приглашаем в свободную нишу «Месторождение глины. Котласский район». URL: <https://smgrf.ru/wp-content/uploads/2023/06/Mestorozhdenie-gliny-Kotlasskij-rajon.pdf> (дата обращения: 18.01.2025).
14. Министерство энергетики РФ: официальный сайт. URL: <https://minenergo.gov.ru/industries/coal/about> (дата обращения: 17.03.2025).
15. Полезные ископаемые России. URL: <https://сезоны-года.рф/полезные%20ископаемые%20России.html> (дата обращения: 17.03.2025).
16. Дорошенко В.В., Синельникова К.П., Воронина В.П. Динамика площадей открытых песков на тестовом полигоне на северо-востоке Ставропольского края в 2022–2023 гг. // *Вопросы степеведения*. 2024. № 2. С. 26–32.
17. Геологоразведка 2023: более 190 новых месторождений, или как ресурсы превращаются в запасы. URL: https://www.mnr.gov.ru/press/news/geologorazvedka_2023_bole_190_novykh_mestorozhdeniy_ili_kak_resursy_prevrashchayutsya_v_zapasy/ (дата обращения: 18.01.2025).
18. Обзор рынка известняка в России. Демонстрационная версия. Москва, февраль, 2010. URL: https://www.infomine.ru/files/catalog/332/file_332.pdf (дата обращения: 18.01.2025).
19. The Global Peatland Database. URL: <https://greifswaldmoor.de/global-peatland-database-en.html> (дата обращения: 18.01.2025).
20. Сирий А.А., Медведева М.А., Иткин В.Ю. Вторичное обводнение неиспользуемых осушенных торфяников и сокращение выбросов парниковых эффектов // *Известия РАН. Серия географическая*. 2023. Т. 87. № 4. С. 597–618.
21. Электронный ресурс. URL: https://yandex.ru/images/search?from=tabbar&img_url=https%3A%2F%2Fupload.wikimedia.org%2Fwikipedia%2Fcommons%2Fthumb%2F%2Ffe%2FBreesen2.jpg%2F440px-Breesen2.jpg&lr=141416&pos=20&rpt=simage&text=торфяной%20карьер (дата обращения: 18.03.2025).
22. Яблонев А.Л. О роли торфа в топливно-энергетическом комплексе города Твери // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2009. № 11. С. 70–73.
23. Яблонев А.Л., Пухова О.В. Современные направления использования торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2010. Вып. 17. С. 104–107.
24. Яблонев А.Л. Проектирование торфодобывающих предприятий: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2016. 164 с.
25. Справочник по торфу / под ред. А.В. Лазарева и С.С. Корчунова. М.: Недра, 1981. 760 с.

26. Практическое руководство по организации добычи фрезерного торфа: учебное пособие / В.И. Смирнов, А.Н. Васильев, А.Е. Афанасьев, А.Н. Болтушкин; под ред. В.И. Смирнова. Тверь: ТГТУ, 2007. 392 с.

27. Филипенко В.С., Веренич А.Ф., Зайцев А.А., Сазончук С.Н. Основные направления и принципы сельскохозяйственного использования торфяных почв // *Вестник Полесского государственного университета. Серия природоведческих наук*. 2009. № 2. С. 32–37.

28. Васильченко А.В. Рекультивация нарушенных земель: учебное пособие: в 2 ч. Оренбург: ОГУ, 2017. Ч. 2. 158 с.

29. Тарасова А.А., Емельянова И.М. Комплексное использование торфяных болот в Нечерноземной зоне. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Колос, 1971. 152 с.

30. Панов В.В., Цымлякова С.С. Анализ горнотехнических условий выработанного торфяного месторождения Васильевский Мох и перспективы его использования // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. № 1. С. 79–84.

31. Морозов А.Е. Эффективность лесной рекультивации земель, нарушенных при добыче торфа (на примере Басьяновского месторождения) // *Леса России и хозяйство в них*. 2021. № 1 (76). С. 13–22.

Для цитирования: Андрианова А.А., Яблонев А.Л. Обзор методов комплексного использования выработанных месторождений торфа в сравнении с другими горными породами, добываемыми открытым способом // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 26–40.

REVIEW OF METHODS OF INTEGRATED USE OF MINED PEAT DEPOSITS IN COMPARISON WITH OTHER ROCKS EXTRACTED BY OPEN MINING

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

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

It is indicated that the open-pit mining method involves large violations of the earth's surface, and, consequently, the presence of depleted quarries after the end of mining. It is noted that since the areas of these quarries are very significant, there is a problem of their return to economic activity, which is solved in various ways, including reclamation. The traditional directions of involving developed quarries in economic turnover (creation of agricultural land, construction, afforestation, creation of ponds, parks, recreation areas) are listed. The conclusion is made: since the developed peat deposits have pronounced specifics that limit their introduction into economic activity, the most relevant integrated use for them is the creation of ponds with subsequent stocking.

Keywords: worked-out deposit, mineral resource, complex use, reclamation, stocking with fish, peat bog, economic activity.

Поступила в редакцию/received: 24.01.2025; после рецензирования/revised: 14.02.2025;
принята/accepted: 21.02.2025

ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГИДРОФОБИЗАЦИИ ТОРФОМАССЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КУСКОВОГО ТОРФА

А.В. КУПОРОВА, канд. техн. наук

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

© Купорова А.В., 2025

Проанализированы технологические показатели производства кускового торфа, полученные по базовой технологии добычи куска и предлагаемой технологии добычи кускового торфа с применением гидрофобизации торфяной массы непосредственно перед ее формованием. Приведены результаты исследований, посвященных определению прочности образцов кускового торфа, а также рассчитаны основные технологические показатели производства кускового торфа с применением модифицирующих добавок. Установлено, что использование гидрофобных добавок положительно влияет на прочностные характеристики кускового торфа, что позволяет снизить потери при хранении и транспортировке готовой продукции. Сделан вывод, что применение при реализации технологии производства кускового торфа гидрофобных добавок дает возможность уменьшить начальную формовочную влажность кусков и тем самым минимизировать энергетические затраты на производство, а также ослабить зависимость технологии производства от метеорологических условий региона.

Ключевые слова: кусковой торф, формовочная влажность, топливо, гидрофобная добавка, прочность, технологические показатели.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-41-50

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире вследствие развития технологий, а также увеличения добычи природного газа, нефти, угля торф незаслуженно забыт как в России, так и в некогда ведущих мировых торфодобывающих странах. Существующие запасы углеводородного сырья и скорость их использования человечеством в скором времени приведут к возникновению потребности искать их адекватную замену. И тогда на первое место выйдет применение энергии возобновляемых источников, к которым с недавнего времени официально причислен торф. Уникальные физические и химические свойства торфа позволяют использовать его при производстве многих видов продукции [1]. А применение торфа в качестве местного топлива влечет за собой целый ряд положительных последствий, связанных с социально-экономическим развитием территорий.

В труднодоступных регионах в основном преобладают месторождения низинного торфа, из которого получают коммунально-бытовое кусковое топливо низкого качества. При хранении такое топливо разрушается, его становится неудобно использовать в топочных агрегатах, работающих на таком топливе. Повысить качество и снизить крошимость кускового торфяного топлива можно, применяя физико-химические методы обогащения.

Основными проблемами реализации действующей технологии являются зависимость от погодных условий, сравнительно низкий сезонный сбор, сложность

обеспечения стабильных, качественных характеристик полезного ископаемого на этапе его добычи, а также невозможность предварительной модификации сырья [2]. Поэтому все большую актуальность приобретает производство гидрофобной торфяной продукции. Цели работы – исследование процесса сушки и увлажнения гидрофобно-модифицированного кускового торфа и оценка его прочностных и водно-физических характеристик, а также возможности применения гидрофобных добавок в технологии производства кускового торфа [3].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Прочность торфяных систем обеспечивают капиллярные силы, межмолекулярные и водородные связи. Энергия капиллярных сил невелика и составляет около 0,419 кДж/моль, межмолекулярных сил Ван-дер-Ваальса – 4–8 кДж/моль, водородной связи – 16,8–33,5 кДж/моль.

Механизм формирования прочной структуры торфяных систем при их обезвоживании (сушке) очень сложен [4], поскольку на прочность оказывает влияние не только физико-химическая природа торфяного сырья (степень разложения, содержание гуминовых веществ, тип их надмолекулярных структур и др.), но и технологические факторы (качество перемешивания, диспергирование, наличие дополнительных компонентов, режим сушки и др.) [5, 6].

Для торфяных коллоидных капиллярно-пористых систем, в отличие, например, от бетона, цементов, гипса, металлов, полимеров и прочих, требования ГОСТов по прочностным показателям отсутствуют. И по отношению к торфу прочность в определенной степени прилагается как условное понятие. Причем оно зависит от различных факторов, параметров и характеристик (в том числе и природных) [7].

При исследовании прочностных показателей формованных образцов торфа находят прочность на одноосное сжатие $R_{сж}$ и изгиб $R_{изг}$. Для определения прочности на одноосное сжатие используется экспериментальная установка, изготовленная на базе машины для испытания пружин серии TLS-S производства компании TIME Group Inc. (рис. 1).



Рис. 1. Экспериментальная установка для испытания цилиндрических кусков на сжатие

Тем не менее из-за того, что большинство операций по производству кускового торфа после его формования (ворочка, валкование, переукладка валков, уборка) связано с деформациями изгиба куска, испытания прочности на изгиб дают дополнительную информацию для обоснования технологии этого процесса.

Так же, как и в случае с определением прочности на сжатие, измеряют площадь поперечного сечения куска, устанавливают требуемое расстояние между опорами, на которые кладут сам образец. Затем включают цифровой динамометр (необходим предварительный прогрев в течение 10 мин), обнуляют его показания. Далее его переводят в режим фиксации значения максимальной разрушающей нагрузки. К находящемуся на установочных опорах испытываемому образцу штурвалом подводится конический наконечник стенда (рис. 2) [3, 8].



Рис. 2. Определение прочности образцов кускового торфа цилиндрической формы на изгиб

Методика расчета продолжительности сушки кускового торфа была разработана на основе теоретических и экспериментальных исследований Всесоюзного научно-исследовательского института торфяной промышленности (ВНИИТП), Калининского филиала ВНИИТП, а также Калининского политехнического института (ныне Тверской государственный технический университет). Однако в условиях предварительной гидрофобной обработки торфомассы перед формованием изменяется ряд ее физико-химических характеристик, которые необходимо учесть при прогнозировании продолжительности сушки торфяных кусков.

Для анализа влияния гидрофобной модификации торфомассы на продолжительность сушки кускового торфа кривые интенсивности сушки обычно представляют в виде принципиальной схемы расчета (рис. 3) [9]. Известно, что характер кривой интенсивности (наличие постоянного и убывающего периодов интенсивности обезвоживания) сушки формованного торфа связан с наличием в его объеме капиллярно-пористой структуры. Численные значения характерных точек на кривой будут зависеть от условий внутреннего массопереноса (размера пор и капилляров, плотности, гидрофобности) и внешних (температуры, относительной влажности воздуха, атмосферного давления и др.). Постоянный период будет продолжаться до тех пор, пока дефицит влаги на поверхности (зоне) испарения куска будет компенсироваться ее подпиткой из центральных зон. При этом скорость испарения будет примерно совпадать со скоростью влагопереноса в зону испарения (рис. 3). Как только внутренний влагоперенос замедлится, система перейдет в убывающий период интенсивности сушки, который будет продолжаться до равновесного влагосодержания W_p . Точка перехода из постоянного в убывающий период – первое критическое влагосодержание $W_{кр.1}$.

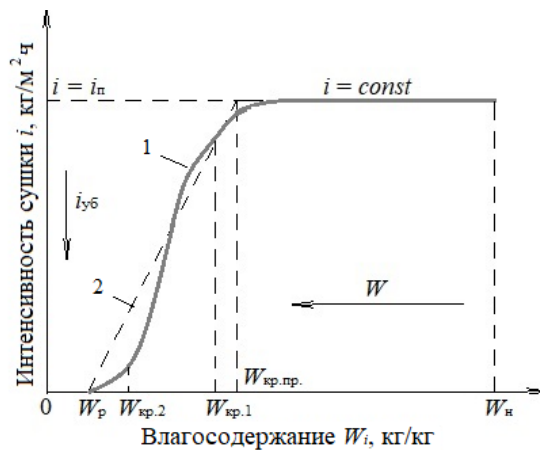


Рис. 3. Принципиальный график интенсивности сушки кускового (формованного) торфа

Интенсивность сушки кускового торфа в убывающем периоде уменьшается по достаточно сложной зависимости (см. рис. 3, кривую 1). С целью упрощения расчетной формулы эта кривая заменяется прямой 2, соединяющей точку приведенного критического влагосодержания $W_{кр.п.}$ с равновесным влагосодержанием W_p . В этом случае интенсивность сушки в убывающем периоде $i_{уб}$ (при $W < W_{кр.п.}$) будет

$$i_{уб} = i_{п} \frac{W - W_p}{W_{кр.п.} - W_p},$$

где $i_{п}$ — интенсивность сушки в постоянном периоде (при $W < W_{кр.п.}$), $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Интенсивность сушки в постоянном периоде рассчитывается по формуле

$$i_{п} = \alpha \cdot i_{и} \cdot A \cdot K_c \exp(-\beta \cdot K_c),$$

где α — постоянная испарителя; $i_{и}$ — испаряемость с водонасыщенной поверхности испарителя Н.М. Топольницкого, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; A — постоянная формы куска (для цилиндрического куска $A = 5,33$); K_c — критерий слоя, который представляет собой отношение толщины куска торфа прямоугольного поперечного сечения ($h_{пл}$) к высоте куска (h_k), т. е. расположенных на одной и той же площади поля сушки; β — величина, зависящая от степени разложения и качества переработки торфомассы, которое будет оказывать воздействие на величину объемной усадки.

Таким образом, $A = d_n \frac{f_n}{V_n}$; $K_{сл} = \frac{P_c \cdot (1 + W_n)}{d_n \cdot \gamma_n}$, где d_n — начальный диаметр

куска, м^2 ; W_n — начальное влагосодержание куска, $\text{кг}/\text{кг}$; P_c — загрузка поля по сухому веществу торфа, $\text{кг}/\text{м}^2$; f_n , V_n и γ_n — геометрическая поверхность, объем и плотность отдельного куска соответственно в начале процесса сушки.

Постоянная α обуславливается глубиной сосуда почвенного испарителя и цветом используемого в нем песка. Для белого кварцевого песка, помещаемого в сосуд на глубину 50 мм, $\alpha = 0,588$, а для черного $\alpha = 0,525$. Произведение $A \cdot K_c$ равно отношению геометрической поверхности кусков торфа F_n к площади поля сушки $F_{п.}$, на которой они расположены:

$$\frac{F_n}{F_{п.}} = A \cdot K_c = \frac{P_c \cdot (1 + W)}{\gamma_n} \cdot \frac{f_n}{V_n}.$$

Эмпирический коэффициент β изменяется в диапазоне 0,75...1,1 и зависит от величины усадки:

$$\beta = \frac{2,5}{2,2 + K_{yc}},$$

где K_{yc} – среднее значение коэффициента объемной усадки торфа, которое обуславливается качественной характеристикой торфяной залежи и степенью механического диспергирования торфа.

В работе [3] коэффициент усадки определялся экспериментальным путем, а в методике ВНИИТП он берется по усредненным данным, указанным в справочной литературе [9].

Продолжительность сушки кускового торфа в постоянном периоде τ_n находят по формуле

$$\tau_n = \frac{P_c}{i_n} \cdot \frac{\bar{F}_n}{\bar{F}_n} \cdot (W_n - W_i) \cdot K_3.$$

Здесь необходимо подчеркнуть, что текущее влагосодержание определяется соотношением $W_i \geq W_{кр. пр}$ – средней площадью поверхности куска в диапазоне влагосодержания от W_n до W_i .

В стандартной методике ВНИИТП коэффициент удлинения сушки за счет влагообмена куска с влажной залежью K_3 устанавливают исходя из того условия, что при величине влагосодержания верхнего 20-миллиметрового слоя залежи более 5 кг/кг сушка будет удлиняться до 20 %. При гидрофобной обработке торфомассы *фактор удлинения сушки учитываться не будет* и $K_3 = 1$.

Для оценки уменьшения площади поверхности куска в процессе сушки в постоянном периоде целесообразно ввести коэффициент $K_{\pi} = \bar{F}_n / F_n$. Он показывает, как будет изменяться площадь поверхности испарения куска в процессе сушки в постоянном периоде, и рассчитывается по формуле [7]:

$$K_{\pi} = \sqrt[3]{\left[\frac{1 + 0,5 \cdot (W_n + W_{кп}) \cdot K_{yc}}{1 + K_{yc} W_n} \right]^2}.$$

При этом делается допущение, что площадь поверхности испарения будет равняться площади поверхности куска, что на самом деле не соответствует действительности. Реально площадь испарения за счет неровности поверхности намного больше, но измерить ее при реализации технологии экономически оправданными средствами не представляется возможным.

Продолжительность сушки кускового торфа в убывающем периоде

$$\tau_y = \frac{P_c}{i_n} \cdot \frac{F_n}{F_y} (W_{кп} - W_p) \ln \frac{W_{кр пр} - W_p}{W_k - W_p} K_3,$$

где \bar{F}_y – средняя площадь поверхности куска в диапазоне влагосодержания от $W_{кп}$ до конечного W_k .

Коэффициент $K_{\text{fy}} = \frac{\bar{F}_y}{F_{\text{H}}}$ демонстрирует изменение площади поверхности куска, но (в отличие от K_{fp}) в убывающем периоде он рассчитывается по формуле

$$K_{\text{fy}} = \sqrt[3]{\left[\frac{1 + 0,5 \cdot (W_{\text{кп}} + W_{\text{кр}}) K_{\text{yc}}}{1 + K_{\text{yc}} W_{\text{H}}} \right]^2}.$$

Приведенное первое критическое влагосодержание

$$W_{\text{кп}} = W_{\text{п}} + B \left[\frac{i_{\text{п}} \cdot d_{\text{H}} (1 + W_{\text{H}})}{A \gamma_{\text{H}}} \cdot \frac{4}{\pi} 10^5 - 0,9 \right],$$

где $W_{\text{п}}$ – среднее влагосодержание поверхности куска торфа, кг/кг; B – величина, обратно пропорциональная коэффициенту диффузии, Н/м².

Значения $W_{\text{п}}$ и B определяются в зависимости от коэффициента объемной усадки торфяного куска

$$W_{\text{п}} = 1,02 \left(\frac{1}{K_{\text{yc}}} \right)^{0,316};$$

$$B = 0,365 - 0,117 K_{\text{yc}}, \text{ если } K_{\text{yc}} \leq 0,9;$$

$$B = 0,26, \text{ если } K_{\text{yc}} > 0,9.$$

При меньшей величине конечного влагосодержания $W_{\text{к}}$ по сравнению с критическим $W_{\text{кп}}$, что соответствует подавляющему большинству случаев, общая продолжительность сушки от начального влагосодержания до конечного τ_0 будет равна сумме длительности постоянного и убывающего периодов:

$$\tau_0 = \tau_{\text{п}} + \tau_{\text{y}}.$$

Осадки увеличивают влажность кусков торфа, поэтому необходимо дополнительное время для испарения поглощенной влаги. Продолжительность сушки с учетом выпадающих в период сушки осадков $\tau_{\text{ос}}$ определяется по формуле

$$\tau_{\text{ос}} = \frac{\tau_0 \cdot i_{\text{п}}}{i_{\text{п}} - h_{\text{ос}} \cdot K_{\text{ос}}},$$

где $h_{\text{ос}}$ – среднегодовое количество осадков кг/(м² ч); $K_{\text{ос}}$ – коэффициент поглощения осадков кусковым торфом:

$$K_{\text{ос}} = \frac{3,9}{R_{\text{T}}} + 0,015(W_{\text{H}} + W_{\text{к}}),$$

где R_{T} – степень разложения торфа, %.

Таким образом, зависимость интенсивности и продолжительности сушки торфа от почвенно-природных факторов обуславливается величинами β , K_3 , K_{fp} и K_{fy} , а также $W_{\text{п}}$ и B . С увеличением коэффициента β (по сути, степеней разложения и механического диспергирования) возрастает коэффициент объемной усадки, а интенсивность сушки в постоянном периоде повышается. Обусловлено это изменением

внутреннего влагопереноса в узких порах, величины альbedo поверхности куска и расположения кусков торфа на поле сушки относительно друг друга [10, 11].

Зависимость интенсивности сушки в постоянном периоде от метеорологических условий определяется величиной комплексного показателя метеорологических условий сушки (испаряемости i_n). Испаряемость при конвективном режиме зависит от температуры, относительной влажности воздуха и скорости ветра, а при радиационно-конвективном – в наибольшей степени от величины солнечной радиации.

Очень важным является то, что к зависимости интенсивности и продолжительности сушки от технологических факторов, определяемых формой и размерами куска (величины A и d), степенью механического диспергирования торфа и условиями расположения кусков на поле сушки (K_c), добавляется степень гидрофобизации их структуры [12]. Она будет оказывать значимое влияние на начальное влагосодержание формования (вызывать его снижение за счет увеличения пластичности торфомассы), влагообмен с залежью (практическое отсутствие), коэффициент поглощения осадков (приводить к его снижению), что должно вызвать уменьшение длительности технологического цикла и улучшение технико-экономических показателей добычи кускового торфа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные эксперименты позволили сделать вывод о положительном влиянии гидрофобизации на прочностные [3, 13] и водно-технические свойства кускового торфа [3, 14], а также технологические показатели производства кускового гидрофобно-модифицированного торфа. Для упрощения задачи и лучшей визуализации полученных экспериментальных данных анализ показателей прочности был проведен в двух особо важных с точки зрения реализации технологии добычи точках, которые характеризуют равновесное ($W_p = 0,3$ кг/кг) и уборочное ($W_{yb} = 0,7$ кг/кг) влагосодержания (табл. 1).

Для установления воздействия гидрофобной модификации торфомассы на продолжительность сушки кускового торфа была выбрана сырьевая база месторождения Куровского, торфяное сырье которого использовалось при проведении исследований [3]; данное сырье было рекомендовано в качестве основного для добычи кускового топливного торфа. Размеры кусков торфа и физико-химические свойства торфомассы соответствуют экспериментальным значениям (60 и 80 мм). Начальное влагосодержание при формовании кусков в действующей технологии принимали равным $W_n = 4,56$ кг/кг ($w = 82$ %), в разрабатываемой – $W_n = 3,35$ кг/кг ($w = 77$ %). Это соответствует разнице в относительной влажности формования в 5 %, которая уменьшается при использовании гидрофобизатора [3].

Таблица 1. Зависимость прочности при сушке экспериментальных образцов от концентрации гидрофобной добавки

Характеристика торфа	Концентрация добавки, %	Прочность, МПа, при			
		$W_p = 0,3$ кг/кг		$W_{yb} = 0,7$ кг/кг	
		Изгиб	Сжатие	Изгиб	Сжатие
Верховой, $R_T = 5 \dots 10$ %	0	0,33	0,71	0,26	0,48
	2	0,30	0,37	0,23	0,27
	4	0,35	0,48	0,26	0,33
	2	1,05	2,38	0,50	1,43
	4	0,71	2,42	0,37	1,09

Произведенные расчеты основных производственных показателей показали, что применение гидрофобизации торфомассы позволяет повысить цикловой сбор на 25 % по сравнению с действующей технологией добычи кускового торфа благодаря снижению начальной влажности формования (увеличению массы сухого вещества). Рост сезонного сбора происходит более радикально за счет 40...45 % увеличения количества технологических циклов из-за существенного падения коэффициента поглощения осадков (в 2,2 раза) и из-за отсутствия влагообмена с подстиляющей залежью. В конечном счете сочетание этих факторов дает возможность увеличить расчетный сезонный сбор торфа в 1,75...1,8 раза [3]. Результаты применения предлагаемой технологии представлены в табл. 2.

Таблица 2. Технологические показатели, влияющие на эффективность производства кускового торфа

№ п/п	Достижимый эффект	Зависимость, отражающая действие полученного эффекта
1	Увеличение циклового сбора $q_{ц}$ за счет возрастания загрузки поля по сухому веществу P_c	$q_{ц} = 10P_c(1 + W_y)\alpha_{сб}$
2	Уменьшение общей (расчетной) продолжительности технологического цикла τ_o , состоящей из продолжительности в постоянном и убывающем периодах сушки	$\tau_o = \tau_{п} + \tau_y$
3	Снижение начального влагосодержания W_n , при котором осуществляется формование кускового торфа, а также отсутствие влагообмена с подстиляющей торфяной залежью, $K_3 = 1$	$\tau_{п} = P_c \frac{W_n - W_{кп}}{K_F \cdot i_{п}} K_3$
4		$\tau_y = \frac{P_c}{i_{п}} \cdot \frac{W_{кп} - W_p}{K_F'} \cdot 2,3 \lg \frac{W_{кп} - W_p}{W_k - W_p} \cdot K_3$
5	Сокращение расчетной продолжительности сушки с учетом коэффициента поглощения осадков $k_{ос}$, который уменьшается в 2 раза	$\tau_{ос} = \tau_o \cdot \frac{i_{п}}{i_{п} - k_h \cdot k_{ос}}$
6	Сокращение продолжительности цикла $n_{ц}$ (влечет за собой увеличение количества циклов и, как следствие, сезонного сбора)	$n_{ц} = \frac{N_c - m_{10} - \tau_{ос}}{\tau_{ос}}$

Примечание. W_y – условное влагосодержание; $\alpha_{сб}$ – коэффициент сбора торфа; W_p – равновесное влагосодержание; k_h – среднесуточное количество осадков; N_c – количество дней в сезоне добычи; m_{10} – количество дней в сезоне с осадками более 10 кг/м².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка технологии производства гидрофобно-модифицированного кускового торфа дает возможность предварительной модификации торфяного сырья, что приводит к улучшению качественных характеристик гидрофобно-модифицированного кускового торфа, повышению основных технологических показателей добычи и, в свою очередь, положительно сказывается на всем технологическом процессе производства.

Прочность контрольных образцов торфа с высокой степенью разложения при равновесном влагосодержании больше в 4,3 раза по сравнению с образцами торфа с низкой степенью разложения. Эта же закономерность наблюдается и при уборочном влагосодержании, хотя здесь рост прочности несколько ниже (в 3,1 раза). Величина прочности остается стабильно высокой и достаточной для проведения всех операций технологического процесса добычи кускового торфа [3].

Гидрофобизация торфяного сырья улучшает качественные характеристики (благодаря минимизации крошимости, увеличению прочности), что удлиняет срок хранения кусковой продукции без ухудшения ее качества, а также делает возможным транспортировку ее в удаленные населенные пункты. Торфяные куски с модифицированными добавками способны к снижению водопоглощательной способности, что благоприятно сказывается на процессе их полевой сушки и хранении на открытых площадках [15].

Производство кускового топлива с добавлением гидрофобного компонента оптимизирует и повышает эффективность добычи торфа. Кроме того, появляется возможность его использования в качестве обогащенного сырья для глубокой химической переработки материалов. Разработка технологии добычи кускового гидрофобно-модифицированного торфа в полевых условиях даст возможность снизить зависимость технологического процесса производства от метеорологических условий сушки и негативного влияния горно-геологических условий, насытить торфяную матрицу дополнительными гидрофобными компонентами [16].

ЛИТЕРАТУРА

1. Яблонев А.Л., Пухова О.В. Современные направления использования торфа // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2010. Вып. 17. С. 104–107.
2. Мисников О.С., Беляков В.А. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. Добыча кускового торфа и сапропеля: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2016. 168 с.
3. Купорова А.В. Геотехнологическое обоснование производства гидрофобно-модифицированного кускового торфа в полевых условиях: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2024. 209 с.
4. Афанасьев А.Е., Болтушкин А.Н. Процессы сушки дисперсных материалов. Тверь: ТГТУ, 2011. 152 с.
5. Лиштван И.И. Современные представления о некоторых физико-химических свойствах торфа // *Химия твердого топлива*. 1977. Т. 11. № 3. С. 35–39.
6. Зюзин Б.Ф., Фомин Д.С. О влиянии физико-механических свойств исходного торфа на процесс механического диспергирования // *Труды Инсторфа*. 2013. № 7 (60). С. 49–52.
7. Лиштван И.И., Базин Е.Т., Косов В.И. Физические свойства торфа и торфяных залежей. Минск: Наука и техника, 1985. 240 с.
8. Патент РФ 2696070. *Устройство для создания и измерения разрушающей нагрузки* // Яблонев А.Л., Гусева А.М., Жуков Н.М. Заявл. 07.12.2018. Опубл. 30.07.2019, Бюл. № 22.
9. Антонов В.Я., Малков Л.М., Гамаюнов Н.И. Технология полевой сушки торфа: учебное пособие / под общ. ред. Л. М. Малкова. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Недра, 1981. 239 с.
10. Афанасьев А.Е., Чураев Н.В. Оптимизация процессов сушки и структурообразования в технологии торфяного производства. М.: Недра, 1992. 288 с.

11. Афанасьев А.Е., Мисников О.С. Оценка структурных характеристик при сушке формованных органических и органоминеральных биогенных материалов // *Теоретические основы химической технологии*. 2003. Т. 37. № 6. С. 620–628.

12. Пащенко А.А., Воронков М.Г., Михайленко Л.А., Круглицкая В.Я., Ласская Е.А. Гидрофобизация. Киев: Наукова думка, 1973. 239 с.

13. Belyakov V., Kuporova A. Influence of Organosilicon Additives on Strength of Sod Peat // *E3S Web of Conferences. V-th International Innovative Mining Symposium*. 2020. P. 01008. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/34/e3sconf_iims2020_01008.pdf (дата обращения: 03.03.2025).

14. Мисников О.С. Изменения водно-физических свойств торфа и торфяных залежей при техногенном воздействии // *Техника и технология горного дела*. 2019. № 2 (5). С. 19–32.

15. Misnikov O. Scientific basis of a new method for hydrophobic modification of mineral binders using peat products // *Mires and Peat*. 2016. V. 18. № 22. P. 1–15.

16. Misnikov O. Perspectives for application of moulded sorption materials based on peat and mineral compositions // *E3S Web of Conferences. II-nd International Innovative Mining Symposium*. 2017. V. 21. P. 01020. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2017/09/e3sconf_2iims2017_01020.pdf (дата обращения: 03.03.2025).

Для цитирования: Купорова А.В. Положительные аспекты применения гидрофобизации торфомассы при производстве кускового торфа // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Техническиенауки». 2025. № 2 (26). С. 41–50.

POSITIVE ASPECTS OF APPLICATION OF PEAT MASS HYDROPHOBIZATION IN SOD PEAT PRODUCTION

A.V. KUPOROVA, Cand. Sc.

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

The technological indicators of lump peat production, obtained using the basic technology of lump extraction and the proposed technology of lump peat extraction using hydrophobization of peat mass immediately before its molding, are analyzed. The results of studies devoted to determining the strength of lump peat samples are presented, as well as the main technological indicators for the production of lump peat using modifying additives are calculated. It has been established that the use of hydrophobic additives has a positive effect on the strength characteristics of lump peat, which reduces losses during storage and transportation of finished products. It is concluded that the use of hydrophobic additives in the implementation of lump peat production technology makes it possible to reduce the initial molding moisture content of the pieces and thereby minimize energy costs for production, as well as weaken the dependence of production technology on the meteorological conditions of the region.

Keywords: sod peat, moulding moisture, fuel, hydrophobic additive, strength, technological parameters.

Поступила в редакцию/received: 06.02.2025; после рецензирования/revised: 14.02.2025;
принята/accepted: 17.02.2025

НЕОБХОДИМОСТЬ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЛОКОВОГО СПОСОБА РАЗРАБОТКИ КАРЬЕРНЫХ ПОЛЕЙ

В.В. АКСЕНОВ^{1,2}, д-р техн. наук, А.В. СЕЛЮКОВ², д-р техн. наук,
Д.А. ПАШКОВ^{1,2}, канд. техн. наук, А.В. ГЕРАСИМОВ², асп.

¹ Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, 650610, Кемерово,
пр. Ленинградский, 10, e-mail: 55vva42@mail.ru

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28

© Аксенов В.В., Селюков А.В., Пашков Д.А., Герасимов А.В., 2025

Рассмотрены особенности существующих технологических решений отработки свит наклонных и крутопадающих пластов, выявлены их недостатки. Представлены особенности блокового способа отработки свит наклонных и крутопадающих пластов. Отмечено, что при отработке карьерного поля с использованием блокового способа сдерживающим фактором является отсутствие научно-технических и научно-методических наработок, направленных на обоснование параметров блоков. Для определения этих параметров и факторов, необходимо разработать математическую модель определения параметров блокового способа.

Ключевые слова: открытые горные работы, внешнее отвалообразование, карьерное поле, система разработки, математическая модель определения параметров блокового способа, блоковый способ, свита пластов.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-51-57

ВВЕДЕНИЕ

Горнодобывающая промышленность составляет одну из основ экономики регионов Российской Федерации. Данный факт подтверждается требованием государства увеличить объемы добываемого полезного ископаемого [1], а это значит, что некоторые районы проживания населения будут находиться в непосредственной близости к объектам указанной промышленности, в том числе открытых горных работ. В связи с этим особое внимание уделяют рациональному недропользованию во время открытой разработки твердых полезных ископаемых.

Перспективным направлением вышеназванного недропользования при развитии открытых горных работ является блоковый способ отработки [2–7].

Согласно официальным данным [8], около 2/3 перспективных угольных участков на территории РФ относят к сложноструктурным месторождениям с крутым и наклонным залеганием свит пластов, отработка которых возможна с применением блокового способа.

ОСОБЕННОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ОТРАБОТКИ СВИТ НАКЛОННЫХ И КРУТОПАДАЮЩИХ ПЛАСТОВ

В своих трудах академик В.В. Ржевский [9–11] приводит классификацию систем открытой разработки, соотнесенную главным образом с высотой рабочей зоны карьера и разделением залежей на горизонтальные и пологие, наклонные и крутые.

Отработка горизонтальных и пологих залежей осуществляется по сплошным системам разработки (рис. 1). Особенности освоения таких залежей заключаются в порядке и последовательности ведения вскрышных и добычных работ и изменении длины фронта работ или высоты отдельных уступов и размеров рабочих площадок, размещении вскрышной породы во внутреннем отвале выработанного пространства.

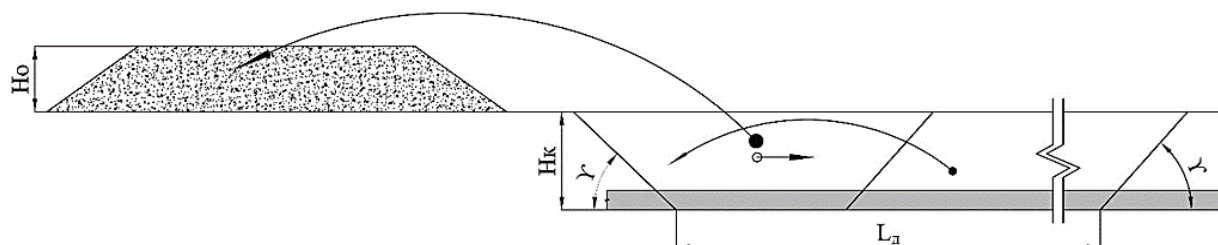


Рис. 1. Принципиальная схема отработки карьерного поля по сплошной системе разработки: H_0 – высота отвала; H_k – глубина карьера; L_d – длина карьера по дну; γ – угол борта в торце

Отработка наклонных и крутопадающих залежей реализуется по углубочным системам (рис. 2–4). Особенности разработки этих залежей состоят в порядке выполнения вскрышных, добычных и регулярных горно-подготовительных работ, размещении вскрышных пород на внешних отвалах за пределами карьерного поля.

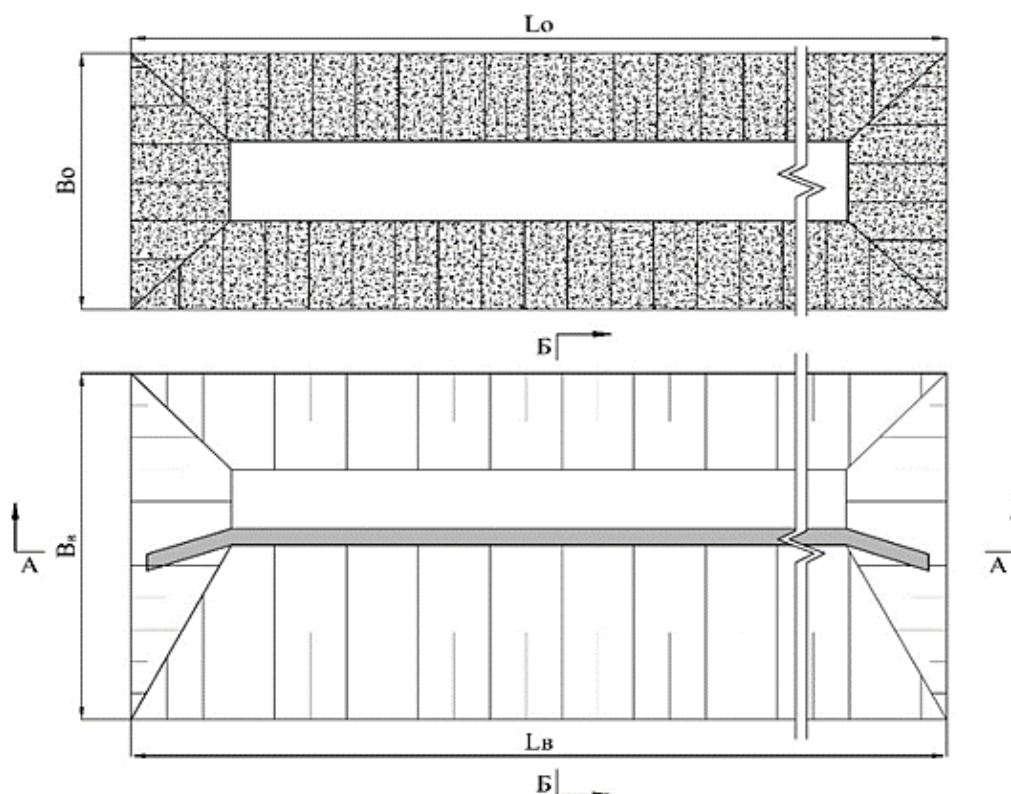


Рис. 2. Принципиальная схема углубочной продольной системы разработки: L_0 – длина отвала; B_0 – ширина карьера; B_v – ширина карьера по верху; L_v – длина карьера по верху

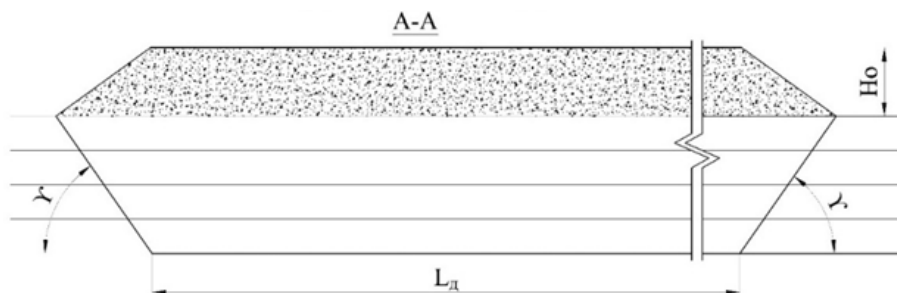


Рис. 3. Продольный профиль карьерного поля, отрабатываемого по углубочной продольной системе разработки:
 H_0 – высота отвала; L_d – длина карьера по дну; γ – угол борта в торце

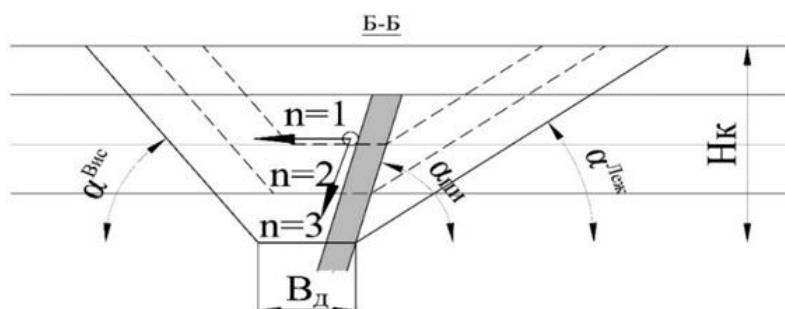



Рис. 4. Поперечный профиль карьерного поля, отрабатываемого по углубочной продольной системе разработки: H_k – глубина карьера; n – контур отработки; $\alpha_{пл}$ – угол падения залежи; $\alpha^{леж}$ – угол борта со стороны лежащего бока залежи; $\alpha^{вис}$ – угол борта со стороны висячего бока залежи; B_d – ширина карьера по дну;  – направление подвигания и углубки фронта горных работ

На основании анализа систем и технологий открытой разработки систематизированы их характеристики (таблица).

Основные черты существующих систем разработки

Система разработки	Перечень особенностей
Сплошная	Применение только при горизонтальных и пологопадающих свитах пластов. Условно постоянная высота рабочей зоны. Возможность размещения внутреннего отвала в выработанном пространстве
Углубочная	Применение только при наклонных и крутопадающих свитах пластов. Изменяющаяся высота рабочей зоны. Размещение вскрышных пород на внешних отвалах

В СССР при отработке наклонных и крутопадающих залежей традиционно с момента появления открытого способа добычи широко использовали углубочные продольные 1- и 2-бортовые системы разработки согласно классификации систем открытой разработки, предложенной академиком В.В. Ржевским [8–10]. Однако данные системы имеют ряд недостатков; из-за них неблагоприятная экологическая обстановка

в угольных бассейнах России будет только усугубляться, в том числе при освоении перспективных залежей.

Основные недочеты вышеназванных систем разработки:

1) с углублением горных работ и развитием внешних отвалов постоянно увеличивается расстояние транспортирования вскрышных пород и, следовательно, возрастают затраты на производство вскрыши;

2) по мере увеличения глубины возрастают общая длина фронта работ и протяженность транспортных коммуникаций, что повышает затраты на их сооружение и содержание;

3) весь объем вскрыши вывозится на внешние отвалы, поэтому для размещения данного объема необходимо наличие больших земельных отводов;

4) велики площади нарушения поверхности, которые являются источниками пылеобразования в районе ведения открытых горных работ;

5) отсутствует возможность восстановления поверхности в процессе эксплуатации месторождения, из-за чего создается большой разрыв во времени между нарушением и рекультивацией земель.

Таким образом, применение углубочных продольных систем разработки приводит к появлению негативных последствий, связанных главным образом с внешним отвалообразованием.

БЛОКОВЫЙ СПОСОБ ОТРАБОТКИ СВИТ НАКЛОННЫХ И КРУТОПАДАЮЩИХ ПЛАСТОВ

Б.Т. Рутковский предложил следующее технологическое решение: деление карьерного поля на блоки производится по его длине на отдельные части – блоки. Отработка блоков ведется последовательно. Первоначальный блок отрабатывается до конечной глубины карьера с вывозкой вскрышной породы автотранспортом на внешний отвал, вскрышная порода последующих блоков размещается во внутреннем отвале предыдущего блока. Далее выработанное пространство второго блока заполняется вскрышей третьего и т. д. (рис. 5).

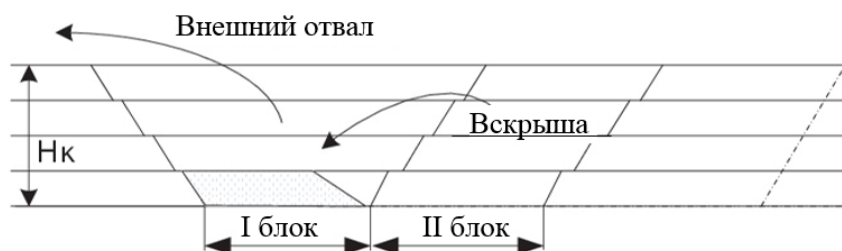


Рис. 5. Общий вид блочного способа по Б.Т. Рутковскому (продольное сечение карьерного поля): H_k – глубина карьера

Б.Т. Рутковским разработан и предложен способ отработки свит пластов наклонного и крутого падения на угольных разрезах. Предложенный способ обладает следующими особенностями:

- 1) делением карьерного поля по его длине на отдельные части – блоки;
- 2) выбором места заложения первоначального блока;
- 3) последовательной отработкой блоков;

4) размещением вскрышных пород при разработке первого блока на внешнем отвале, второго блока в выработанном пространстве первоначального блока – во внутреннем.

Основной недостаток данного способа – отсутствие системных рекомендаций по поводу определения главных параметров блоков и конкретных решений, касающихся выбора места заложения первого блока. Этот и прочие недостатки обусловлены отсутствием взаимосвязи параметров разрабатываемого блока и выработанного пространства отработанного блока, при котором объем разрабатываемых пород невозможно разместить в выработанном пространстве предыдущего блока. Это обстоятельство порождает неравномерность размещения вскрышных пород отработываемого блока в выработанное пространство отработанного, что негативно сказывается на технико-экономических показателях разреза (увеличиваются дальность транспортирования из-за перемещения излишка породы на внешние отвалы, объемы и площади указанных отвалов; вследствие последнего возникает нагрузка на окружающую среду) [12–14].

Таким образом, при отработке карьерного поля с использованием блокового способа сдерживающим фактором является отсутствие научно-технических и научно-методических наработок, обосновывающих параметры блоков. Для установления последних необходимо составить математическую модель определения параметров блокового способа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Увеличение уровня добычи угля порождает необходимость в решении задач минимизации затрат горного производства, повышения эффективности отработки карьерных полей и снижения воздействия на окружающую среду. Перспективным является блоковый способ разработки карьерных полей, предполагающий использование по максимуму выработанного пространства для размещения вскрышных пород. Основной причиной, ограничивающей применение данного способа при отработке карьерного поля, выступает отсутствие научно-технических и научно-методических наработок, в которых обосновываются параметры блоков.

Как было указано выше, существует необходимость разработки модели определения параметров блокового способа с учетом обозначенных особенностей, которая должна:

- 1) предусматривать отработку крутых и наклонных свит пластов;
- 2) обеспечивать сокращение расстояния транспортирования вскрышной породы;
- 3) снижать площадь земель для внешних отвалов;
- 4) способствовать максимальному использованию внутреннего отвалообразования;
- 5) обеспечивать взаимосвязь параметров разрабатываемого блока и выработанного пространства отработанного блока, равномерность размещения вскрышных пород отработываемого блока в указанном пространстве;
- 6) способствовать рациональности и эффективности отработки карьерного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года: Распоряжение Правительства Рос. Федерации от 13.06.2020 № 1582-р. URL: http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&link_id=1&nd=102762578&intelsearch=% (дата обращения: 24.02.2025).

2. Рутковский Б.Т. Блоковый способ отработки месторождений открытым способом // *Добыча угля открытым способом*. 1972. № 1. С. 81–87.
3. Селюков А.В., Литвин Я.О. Технологическое развитие блокового способа открытой разработки угольных месторождений // *Естественные и технические науки*. 2015. № 3 (81). С. 94–97.
4. Селюков А.В., Герасимов А.В. Блоковый способ отработки карьерных полей как инструмент снижения воздействия на окружающую среду в условиях интенсификации производства // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024. Т. 335. № 10. С. 178–188.
5. Селюков А.В., Герасимов А.В. Регулирование дисбаланса объемов отвалообразования при блоковом способе отработки карьерных полей угольных разрезов // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2024. № 3. С. 313–328.
6. Селюков А.В., Герасимов А.В. Проектирование параметров блокового способа открытой угледобычи с применением автотранспортной технологии // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2024. № 2 (162). С. 68–78.
7. Селюков А.В., Герасимов А.В. Обоснование области применения автосамосвалов различной грузоподъемности при блоковом способе отработки карьерного поля // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2024. № 2 (162). С. 57–67.
8. Угольная база России. Том II. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский, Западно-Сибирский бассейны, месторождения Алтайского края и Республики Алтай) / гл. ред. В.Ф. Череповский. М.: ООО «Геоинформцентр», 2003. 604 с. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-ugolnaya-baza-rossii-tom-ii-ugolnye-basseyny.pdf> (дата обращения: 24.02.2025).
9. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Ч. 2. Технология и комплексная механизация. М.: Недра, 1985. 549 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/17740> (дата обращения: 24.02.2025).
10. Ржевский В.В. Процессы открытых горных работ. М.: Недра, 1978. 541 с.
11. Научные основы проектирования карьеров / под общ. ред. В.В. Ржевского, М.Г. Новожилова, Б.П. Юматова. М.: Недра, 1971. 600 с.
12. Ефимов В.И., Минибаев Р.Р., Корчагина Т.В., Новикова Я.А. К вопросу минимизации негативного воздействия горного производства на окружающую среду // *Уголь*. 2017. № 1. С. 66–68.
13. Качурин Н.М., Белая Л.А., Корчагина Т.В. Геоэкологический мониторинг и оценка воздействия на окружающую среду горнопромышленного региона // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2010. № 6. С. 32–37.
14. Счастливцев Е.Л., Степанов Ю.А., Корчагин Т.В. Оценка воздействия техногенных массивов угледобывающих предприятий на атмосферу // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2007. № 2 (60). С. 56–58.
15. Патент РФ 2800752. Способ открытой разработки месторождений полезных ископаемых // Герасимов А.В., Селюков А.В.; Заявл. 27.12.2022. Опубл. 27.07.2023, Бюл. № 21.

Для цитирования: Аксенов В.В., Селюков А.В., Пашков Д.А., Герасимов А.В. Необходимость разработки математической модели определения параметров блокового способа разработки карьерных полей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 51–57.

THE NEED TO DEVELOP A MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE BLOCK METHOD OF DEVELOPING CAREER FIELDS

V.V. AKSENOV ^{1,2}, Dr Sc., A.V. SELYUKOV ², Dr Sc.,
D.A. PASHKOV ², Cand. Sc, A.V. GERASIMOV ², Graduate Student

¹ Institute of Coal FRCCCh of SBR of RAS,
10, Leningrad ave., Kemerovo, 650610, e-mail: 55vva42@mail.ru

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28, Vesennaya str., Kemerovo, 650000

The features of existing technological solutions for mining formations of inclined and steeply falling strata are considered, and their disadvantages are identified. The features of the block method of mining formations of inclined and steeply falling strata are presented. It is noted that when working out a career field using the block method, the lack of scientific, technical and methodological developments aimed at substantiating the parameters of the blocks is a limiting factor. To determine these parameters and factors, it is necessary to develop a mathematical model for determining the parameters of the block method.

Keywords: open-pit mining, external waste dumping, quarry field, development system, mathematical model for determining the parameters of the block method, block method, suite of layers.

Поступила в редакцию/received: 06.02.2025; после рецензирования/revised: 14.02.2025;
принята/accepted: 17.02.2025

УДК 504.55:504.064:502.57(470.331)

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ И ВОЗМОЖНОСТИ ОСВОЕНИЯ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ ЛИКВИДИРОВАННЫХ ШАХТ НЕЛИДОВСКОГО БУРОУГОЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

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

Проанализированы особенности породного отвала. Представлены результаты изучения проблемы накопления и воздействия отходов добычи бурого угля, складываемых в отвалах (техногенных образованиях) ликвидированных шахт, на окружающую среду, а также исследования отвальной породы и проб грунта на содержание соединений тяжелых металлов и уровня активной реакции среды (рН). Дана оценка влияния техногенных месторождений на водные объекты, находящиеся в зоне техногенного образования. Обоснованы необходимость и возможность рационального освоения породных отвалов ликвидированных шахт.

Ключевые слова: породный отвал, горнопромышленные отходы, комплексное освоение, тяжелые металлы, террикон, поллютанты, техногенное месторождение.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-57-65

ВВЕДЕНИЕ

За последнее столетие на территории РФ из-за хозяйственной деятельности горных предприятий, которые на данный момент ликвидированы, образовалось огромное количество техногенных месторождений, которые являются объектами накопленного вреда окружающей среде [1–3]. Указанные месторождения представляют собой места складирования отходов добычи и обогащения полезных ископаемых, возникновение которых в большинстве случаев было обусловлено несовершенством технологий отвалообразования и обогащения минерального сырья [3].

В ходе многолетней деятельности предприятий горнопромышленные отходы стали источником техногенного воздействия на окружающую среду; полное устранение таких отходов требует существенных материальных затрат [1]. Ситуация осложняется еще и тем, что часто породные отвалы расположены в непосредственной близости от населенных пунктов [3].

Многие горные предприятия РФ в 90-е гг. XX в. не смогли преодолеть экономические трудности, обанкротились и в итоге были закрыты. Консервация породных отвалов ликвидированных организаций не была проведена. Фактически данные отвалы были брошены и никак не контролировались, что ухудшило экологическую ситуацию в зоне влияния техногенных образований из-за высокого содержания в последних токсичных соединений [1–3]. Отметим, что многие отечественные [2, 4–7] и зарубежные исследователи [8–10] признают: техногенные месторождения обладают значительными запасами ценного минерального сырья, рациональная переработка которого позволит снизить объемы потребления невозобновимых природных минеральных ресурсов. Следовательно, необходимы комплексный подход к изучению породных отвалов ликвидированных шахт, создание геотехнологий их правильного освоения с последующей рекультивацией, что обеспечит экологическую безопасность техногенных образований [3, 6, 11]. Поэтому цель нашего исследования состояла в установлении необходимости и возможности реализации породных отвалов ликвидированных шахт Нелидовского бурого угольного месторождения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования – породный отвал месторождения бурого угля ликвидированного в 1998 г. горнопромышленного предприятия, расположенного в Нелидовском районе Тверской области.

Нелидовское месторождение относится к Подмосковному бурого угольному бассейну и по инженерно-геологическим условиям принадлежит к месторождениям средней категории сложности. Условия являются трудными, неблагоприятными из-за наличия в кровле и почве угольного пласта песков, обладающих плавунными свойствами, неустойчивых глин, вызывающих пучение почвы. На указанном месторождении распространены преимущественно гумусовые разновидности угля (дюрен, кларено-дюрен и кларен), реже встречаются гумусово-сапропелевые виды. Отмечают непостоянство химического состава угля как следствие его неоднородности [12–14].

Добыча угля на Нелидовском месторождении осуществлялась закрытым (шахтным) способом и в результате сформировались отвалы (терриконы) конической формы, отличающиеся по своему составу от фоновых пород. После закрытия горнодобывающего предприятия техногенные массивы остались фактически бесхозными, консервация их не была проведена. Положение, как мы отмечали выше, усугубляется тем, что породный отвал расположен вблизи населенного пункта и является источником устойчивой долговременной техногенной нагрузки на окружающую среду.

Исследование включало два этапа. Сначала для обоснования необходимости применения геотехнологий освоения породного отвала проводилась оценка накопленного экологического вреда на прилегающей территории, состоящая в рекогносцировочном изучении грунта и водных объектов в границах влияния отвала, расположенного на северной окраине Нелидово [15].

Работы проводились на ключевых участках вблизи отвала нелидовских шахт, а также в реке Каменке и озерах, находящихся на северо-западной и южной сторонах от объекта (рис. 1).

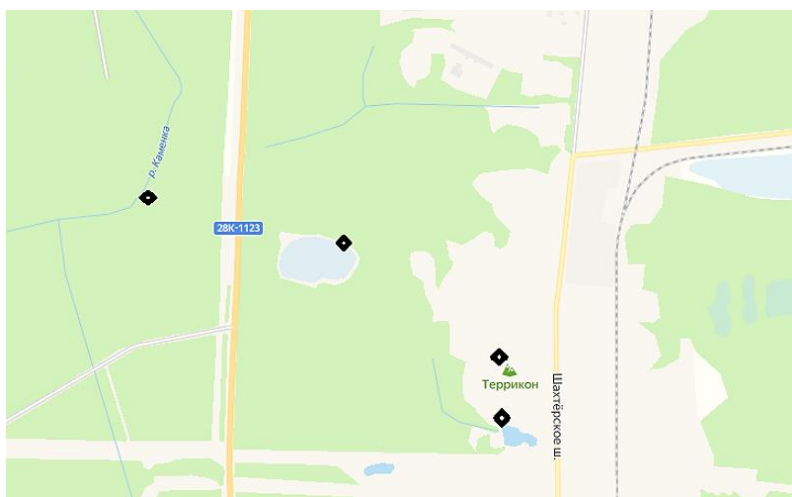


Рис. 1. Карта-схема отбора проб вблизи отвала (террикона) нелидовских шахт [16]

В пробах образцов почв и вскрышных пород террикона определяли активную кислотность (рН) потенциометрическим методом, обменную кислотность – методом Соколова, электропроводность – кондуктометрическим методом, содержание тяжелых металлов – по стандартной методике [17–19].

Были проанализированы такие показатели пробы воды, как водородный (рН), цветность, мутность, гидрокарбонаты, окисляемость бихроматная, нефтепродукты, аммоний, хлориды, нитриты, сульфаты, нитраты, фториды, фосфаты, железо общее, марганец, цинк, кадмий, свинец, медь, ртуть, мышьяк, калий, натрий, литий, магний, стронций, барий, кальций, растворенный углекислый газ, жесткость, минерализация по стандартным методикам [15].

На втором этапе проводилась оценка возможности применения технологий освоения породного отвала ликвидированного нелидовского горнопромышленного предприятия. Обоснование возможности освоения техногенного образования основано на изучении физико-химических свойств и состоянии горной массы, что позволит выбрать рациональную геотехнологию переработки отходов горнодобывающей компании.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Многолетнее формирование породного отвала нелидовских шахт привело к изменению качества объектов окружающей среды и трансформации свойств складированной горной массы.

Коническая форма отвала способствовала развитию на незадернованных склонах физического выветривания, водной эрозии за счет поверхностного стока талых и дождевых вод. В результате произошли смывание токсичной (сернокислой за счет окисления пирита) породы и формирование техногенных наносов и конусов выноса (шлейфов) у подножья террикона (рис. 2) протяженностью до нескольких сотен метров [20–21].



Рис. 2. Породные отходы Нелидовского месторождения

Образование конусов выноса происходит, когда отвал при наличии повышенной увлажненности достигает своей критической высоты с возникновением интенсивного бокового расприания и выдавливанием слоя горной массы в нижние части массива. В этом случае углы внутреннего трения уменьшаются до минимальных значений.

При формировании техногенных массивов необходимо проводить расчет устойчивости отвалов на основании методов, учитывающих нормативные требования к таким объектам [22].

В предлагаемых методиках [22] предельное равновесие определяется с учетом наличия в основании слабого слоя и силы бокового расприания F при достижении техногенным массивом критической высоты (рис. 3). В случае отрицательных и положительных значений углов наклона основания данного массива β коэффициент запаса устойчивости η устанавливают с помощью зависимости

$$\eta = \frac{\left[B \sin\left(45 + \frac{\varphi}{2} - \beta\right) + \gamma S_2 \cos \beta \right] \operatorname{tg} \varphi_k + \rho_k(k_1 - k_2)}{B \sin\left(45 - \frac{\varphi}{2} - \beta\right) - \gamma S_2 \cos \beta + FK_p},$$

где B – направление реакций, совпадающих с наклоном площадок скольжения в основании последующего блока; φ , φ_k – угол внутреннего трения верхней и нижней части отвала соответственно, град.; ρ_k – удельное сцепление нижней части отвала, т/м³; S_2 – площадь призмы упора, включая слабый слой, м²; F – боковое расприание, т/м²; K_p – коэффициент бокового расприания; γ – плотность пород, т/м³.

Направление реакций находят по уравнению

$$B = gS_1 \sin\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) - \gamma S_2 \cos\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \operatorname{tg} \varphi - \rho(K - G),$$

где ρ – удельное сцепление верхней части отвала, т/м³; S_1 – площадь призмы активного давления, м²; g – масса породы, т; H – высота отвала, м; K , G – геометрические характеристики отвала, м.

Значения геометрических характеристик отвала β , K , G , B , R , k_1 , k_2 определяют из расчетной схемы (рис. 3).

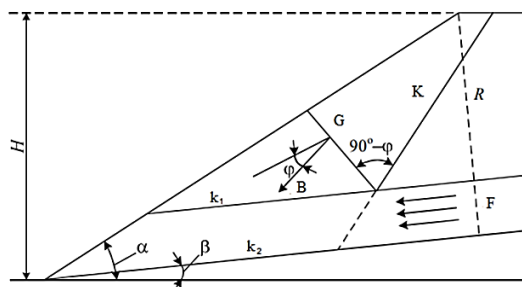


Рис. 3. Схема к расчету устойчивости породных отвалов:
 α – угол наклона основания отвала, град.

Устойчивость откосов техногенного массива зависит от серьезных факторов природного и техногенного происхождения, поэтому расчет коэффициента устойчивости отвала представляет собой непростую задачу. Наиболее сложно найти коэффициент бокового распираения, значение которого в зернистой среде может изменяться в диапазоне от 0 до 0,41 [22].

В процессе формирования конуса выноса техногенных наносов исследуемого породного отвала происходит формирование дерново-подзолистых техногенно-трансформированных почв, под шлейфом которого находятся дерново-подзолистые почвы с $pH = 5,2$.

Проведенные исследования показали: породная масса имеет сильноокислую реакцию среды ($pH = 2,4 \dots 3,1$), возникшую из-за образования серной кислоты и сульфата железа при окислении пирита. Техногенные грунты имеют значительный уровень электропроводности (до 504 $\mu S/cm$); концентрации тяжелых металлов практически не превышают нормативных значений, что подтверждает наличие процессов выщелачивания химических веществ при низких значениях pH грунта. Дерново-подзолистые и условно фоновые почвы характеризуются меньшим содержанием тяжелых металлов и значением электропроводности (51 $\mu S/cm$), чем отвальная порода (табл. 1).

Таблица 1. Значение pH и содержание тяжелых металлов в отвальной породе и почве

Грунт	Электро-проводность, $\mu S/cm$	pH	Содержание тяжелых металлов, мг/кг				
			Zn	Cd	Cu	Sr	Mn
Техногенный (отвальная порода)	290...504	2,4...3,1	21,4...26,8	4,5...10,1	8,8...12,5	19,2...34,8	10,3...38,3
Условно фоновый (дерново-подзолистая почва)	51	5,2	16,8	3,9	6,2	5,4	11,3

Результаты изучения озер, расположенных в зоне влияния породных отвалов (табл. 2), позволили выявить в отобранных пробах воды превышение предельно-допустимых концентраций загрязняющих веществ с 6 до 70 раз и низкие значения активной реакции среды ($pH = 3,9 \dots 4,0$). В реке Каменке превышений допустимых значений концентраций поллютантов не зафиксировано.

Таблица 2. Значение pH и содержание тяжелых металлов в водных объектах

Место, откуда был взят грунт	pH	Содержание тяжелых металлов, мг/кг				
		Zn	Cd	Cu	Sr	Mn
Река Каменка	7,1	0,003...0,005	0,002...0,004	0,0011...0,0015	0,01...0,028	0,007...0,008
Озера	3,9...4,0	0,2...0,62	0,048...0,067	0,024...0,033	2,1...2,72	0,16...0,22

Формирование литохимических и гидрохимических ореолов загрязнения связано с процессами вымывания и последующей миграцией по природным транспортным каналам загрязняющих компонентов отвальной породы. В результате нарушаются плодородие почв, качество воды водных объектов; наблюдаются процессы, мешающие растительности, вследствие чего вокруг террикона возникает техногенная пустыня.

Для повышения безопасности и реабилитации земель территории Нелидовского бурогольного месторождения необходимо использовать геотехнологические подходы к его освоению с последующей рекультивацией породных отвалов ликвидированных шахт. Это направление характеризуется наличием четырех аспектов:

- 1) изучение проблемы восстановления земель должно осуществляться в целом для территорий, нарушенных в процессе добычи полезных ископаемых;
- 2) необходимо установление условий формирования, складирования и хранения горнопромышленных отходов;
- 3) нужно исследовать свойства отвальной породы с целью выявления сохранности ценных компонентов долго лежавшей горной массы;
- 4) требуется анализ возможности перевода объекта складирования горнопромышленных отходов в категорию техногенного месторождения на основании технико-экономической оценки запасов сырья.

Современные подходы при выборе стратегии освоения техногенных месторождений основаны на сочетании физико-технической и физико-химической геотехнологий. Первая базируется на применении методов, заключающихся в извлечении полезных компонентов без изменения агрегатного состояния и химических свойств сырья и дальнейшего применения механического и буровзрывного способов его отделения от техногенного массива. Вторая технология подразумевает использование тепловых, массообменных, химических процессов для перевода ценного компонента отвальной массы в подвижное состояние. Рациональная комбинация геотехнологий обеспечит комплексное освоение породных отвалов и позволит снизить техногенную нагрузку на окружающую среду [23].

Технологии комплексного освоения породных отвалов ликвидированных горнопромышленных предприятий должны соответствовать принципам устойчивого

развития территорий и реализовываться с учетом экономических, эколого-релевантных и социальных факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На постэксплуатационном этапе функционирования нелидовских шахт вмещающие породы отвала из-за длительного нахождения на поверхности подвергались процессам физического выветривания и водной эрозии, что вызвало миграцию на прилегающие территории техногенных наносов, поллютантов и кислотных растворов. В результате сформировались конусы выноса складировемых отходов добычи, отличающиеся неоднородность состава и свойств. Важной характеристикой, обеспечивающей безопасность складирования горной массы, является устойчивость отвала, определяемая с учетом нормативных требований к отвалообразованию.

Вскрышные породы Нелидовского месторождения отличаются (по сравнению с природными почвами) сильноокислой средой ($pH = 2,4 \dots 3,1$) и малым содержанием тяжелых металлов, что связано с процессами выщелачивания загрязнителей из горной массы.

Водные объекты, непосредственно прилегающие к террикону, характеризуются низкими значениями кислотности ($pH = 3,9 \dots 4,0$), а содержание тяжелых металлов в воде в 70 раз превышает предельно-допустимые концентрации. Причина последнего состоит в поступлении поллютантов породной массы в объекты окружающей среды, наличие данных веществ вызвало деградацию этих объектов.

Высокая техногенная нагрузка на прилегающую к ликвидированным нелидовским шахтам территорию обуславливает необходимость применения геотехнологий освоения техногенных месторождений, позволяющих снизить накопленный экологический вред окружающей среде.

Для обоснования геотехнологической направленности комплексного освоения техногенных месторождений необходимо установить минеральный, химический состав, распределение ценных компонентов в отвальной породе, изучить процессы преобразования техногенного сырья.

Таким образом, стратегия комплексного освоения породных отвалов ликвидированных горнопромышленных предприятий должна базироваться на применении рациональных геотехнологий, основанных на комбинации процессов физико-технического и физико-химического извлечения полезных компонентов техногенного сырья, что позволит расширить возможности использования отходов угледобычи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болтыров В.Б., Стороженко Л.А., Сапсай М.А. Накопленный экологический вред территорий размещения горнопромышленных отходов прошлых лет // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 5–2. С. 202–217. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nakoplennyy-ekologicheskiy-vred-territoriy-razmescheniya-gornopromyshlennyh-othodov-proshlyh-let/viewer> (дата обращения: 01.02.2025).

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

3. 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*. 2021. № 2. С. 5–21. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnogennye-poverhnostnye-obrazovaniya-kak-istochnik-zagryazneniya-ekosfery-i-obosnovanie-vozmozhnosti-ih-osvoeniya-v/viewer> (дата обращения: 01.02.2025).

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

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

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

7. Макаров А.Б., Талалай А.Г., Хасанова Г.Г. Геолого-промышленные типы техногенных месторождений // *Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН*. 2018. № 8 (284). С. 39–45.

8. Noviks G. Eco-innovative solutions for the processing of technogenic mineral resources // *Environment. Technology. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2019. V. 1. P. 204–209.

9. Abay A., Imbuga M., Malik Ch., Singh K., Borodin D. Geo-Resources Recycling as the Way of Mining Wastes Disposing // *International Innovative Mining Symposium*. 2018. V. 41. P. 02010.

10. Sapsford D., Cleall P., Harbottle M. In situ resource recovery from waste repositories: exploring the potential for mobilization and capture of metals from anthropogenic ores // *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2017. V. 3. № 2. P. 375–392.

11. 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.

12. Геологическое описание Нелидово-Селижаровского угленосного района. URL: <https://industrial-wood.ru/geologiya-mestorozhdeniy-uglya/15669-geologicheskoe-opisanie-nelidovo-selizharovskogo-uglenosnogo-rayona.html> (дата обращения: 01.02.2025).

13. Калаева С.З., Богданов С.М., Лукин Н.О., Огер А.А. Породные отвалы угольных шахт России // *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2016. № 1. С. 3–23.

14. Подмосковский угольный бассейн / под общ. ред. В.А. Потапенко. Тула: Гриф и К°, 2000. 276 с.

15. Лобачева Л.В., Левинский В.В. Исследование воздействия отходов добычи бурого угля на окружающую среду // *Экология и безопасность жизнедеятельности: Сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции* / ред.: В.А. Селезнев, И.А. Лушкин. Пенза: Пензенский ГАУ, 2023. С. 236–239.

16. Тверская область. Террикон поселка Нелидово. URL: <https://yandex.ru/maps/geo/terrikon/5866397347/?ll=32.782915%2C56.244153&z=15> (дата обращения: 03.02.2025).

17. 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.

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

19. ПНД Ф 12.1:2.2:2.3:3.2-03. Отбор проб почв, грунтов, донных отложений, илов, осадков сточных вод, шламов промышленных сточных вод, отходов производства и потребления. М.: ФБУ «ФЦАО», 2014. 14 с.

20. Костин А.С., Кречетов П.П. Трансформация почв в зоне влияния отвалов Подмосковского бурогоугольного бассейна // *Почвы и земельные ресурсы: современное состояние, проблемы рационального использования, геоинформационное картографирование: Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию кафедры почвоведения БГУ и 80-летию со дня рождения В.С. Аношко*. Минск: БГУ, 2018. С. 213–219.

21. Солнцева Н.П., Рубилина Н.Е. Морфология почв, трансформированных при угледобыче // *Почвоведение*. 1987. № 2. С. 104–108.

22. Гребенкин С.С., Буряк Д.С., Розанова Е.Н. Влияние породных отвалов закрывающихся шахт на состояние объектов окружающей среды // *Научный вестник НИИГД «Респиратор»*. 2016. № 1 (53). С. 74–81.

23. Валиев Н.Г., Славиковский О.В. Исследование технологии комплексного извлечения минеральных ресурсов недр и техногенных образований // *Известия вузов. Горный журнал*. 2014. № 6. С. 22–26.

Для цитирования: Лобачева Л.В. Обоснование необходимости и возможности освоения породных отвалов ликвидированных шахт Нелидовского бурогоугольного месторождения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 57–65.

JUSTIFICATION OF TECHNOLOGY FOR INTEGRATED DEVELOPMENT OF TECHNOGENIC BROWN COAL DEPOSITS

L.V. LOBACHEVA, Cand. Sc.

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

The features of the waste dump are analyzed. The results of the study of the problem of accumulation and impact of brown coal mining waste stored in dumps (technogenic formations) of abandoned mines on the environment are presented, as well as the study of waste dumps and soil samples for the content of heavy metal compounds and the level of active reaction of the environment (pH). An assessment of the impact of technogenic deposits on water bodies located in the zone of technogenic formation is given. The necessity and possibility of rational development of waste dumps of abandoned mines are substantiated.

Keywords: rock dump, mining waste, integrated development, heavy metals, spoil heap, pollutants, technogenic deposit.

Поступила в редакцию/received: 12.02.2025; после рецензирования/revised: 14.02.2025;
принята/accepted: 17.02.2025

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 004.93

РАСПОЗНАВАНИЕ И ОЦЕНКА РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПОМОЩИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

С.А. ГУЛЯЕВ, асп., М.В. ТАРАЧКОВ, канд. техн. наук,
О.В. ТОЛСТЕЛЬ, канд. техн. наук, А.Е. ШИРКИН, ассистент

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,
236041, Калининград, ул. Александра Невского, 14, e-mail: shirkin39@mail.ru

© Гуляев С.А., Тарачков М.В., Толстель О.В., Ширкин А.Е., 2025

Разработана практическая база для реализации 3D-оценки позиции. В первой части статьи проанализирована система автоматизации минимаркетов, которая использует YOLOv8 для распознавания товаров. Во второй части исследованы методы распознавания и сегментации объектов: применение моделей YOLOv8 для распознавания объектов и U-Net для семантической сегментации 3D-моделей. Сделан вывод, что данные работы являются составляющими для решения задачи 3D-оценки позиции и представляют собой обзор решений нескольких небольших задач с использованием нейронных сетей.

Ключевые слова: нейронные сети, YOLOv8, U-Net, распознавание объектов, оценка расположения, сегментация изображений, автоматизация, минимаркет, детекция.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-66-77

ВВЕДЕНИЕ

Современные нейронные сети, задействованные в области компьютерного зрения, могут решать обширный диапазон задач в таких сферах, как торговля, робототехника и промышленная автоматизация. Для решения более сложных вопросов, (например, для оценки 3D-объекта по изображению) необходимо решить несколько подзадач (а именно детектирования, сегментации и непосредственной локализации объектов), что даст возможность получить требуемый результат. Для этого проанализируем в пределах статьи такие подходы, как использование YOLOv8 [1] для автоматизации минимаркетов, что обеспечит распознавание и классификацию товаров, и применение YOLOv8 для детекции и U-Net [2] с целью семантической сегментации механических деталей и последующего нахождения расстояния до объекта, расположенного на плоскости. Полученная база и проведенное исследование подходов позволят перейти к решению задачи локализации, или оценки, положения объектов в 3D-пространстве. Таким образом, целью данной статьи является разработка практической базы для реализации 3D-оценки позиции. Для достижения цели нужно решить две практические задачи, применив при этом составляющие 3D-оценки позиции: 2D-детекцию и сегментацию объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Решение поставленных задач состоит из трех этапов:

1. Автоматизации работы минимаркета и решения задачи детектирования.
2. Детектирования элементарных геометрических фигур на изображении при помощи нейронных сетей.
3. Детектирования и сегментации механических деталей.

В свою очередь, первый этап разбивается на два:

1. Автоматизации работы минимаркета.
2. Использования YOLOv8 для распознавания товаров.

В рамках второго подхода рассматривается решение задачи детектирования простых геометрических фигур при помощи YOLOv8. При третьем подходе решается задача семантической сегментации реальных промышленных деталей, смоделированных в 3D и проецированных на изображение. В нем используется нейронная сеть U-Net. Далее с учетом эвристического подхода и того, что объекты находятся на плоскости, производится геометрический расчет расстояния до объекта.

1. АВТОМАТИЗАЦИЯ РАБОТЫ МИНИМАРКЕТА

Проведем разработку информационной системы управления бесконтактным минимаркетом, осуществляющим распознавание товаров и автоматическое проведение платежей, а также сборку работоспособного стенда для демонстрации работы системы (рис. 1).

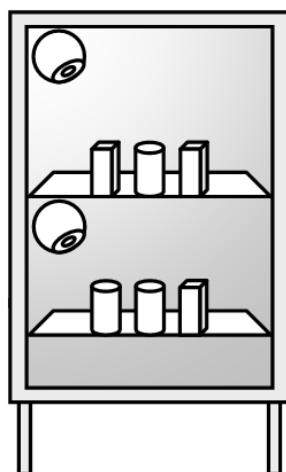


Рис. 1. Макет минимаркета

Микромаркет – это умный торговый холодильник с товарами, который работает по принципу самообслуживания, т. е. без участия продавца. Основная идея проекта заключалась в минимизации действий со стороны покупателя, а также времени, затраченного на покупку: покупатель открывает микромаркет с помощью веб-приложения, берет необходимые товары и закрывает его (в данном случае дополнительные действия не требуются) (рис. 2). Подсчет и определение взятых товаров происходят автоматически при помощи нейронной сети, затем покупателю выставляется счет на оплату в приложении.

Минимаркет – это магазин, который состоит из нескольких таких микромаркетов (умных холодильников), т. е. торговая точка с полным самообслуживанием.

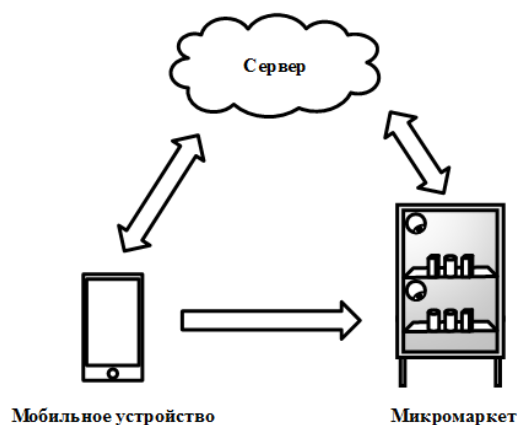


Рис. 2. Схема работы микромаркета

Основными задачами здесь являлись:

1. Разработка информационной системы управления минимаркетом, а именно интерфейса для покупателей, серверной части, программного обеспечения для аппаратной части, а также обучение и настройка работы нейросети.

2. Сборка тестового стенда для демонстрации работоспособности системы.

Использование модели YOLOv8 для распознавания товаров было одной из составных частей нашей работы.

Использование YOLOv8 для распознавания товаров

Система управления минимаркетом использует YOLOv8 для распознавания предметов, за счет чего оптимизируется процесс покупки. Таким образом устраняется необходимость в ручном сканировании товаров (сейчас рынок представлен только микромаркетами с вышеназванным сканированием).

Особое внимание при реализации проекта уделялось тому, чтобы система могла распознавать товары на полках микромаркета, классифицировать их и передавать информацию о покупках в систему учета в режиме реального времени (рис. 3).

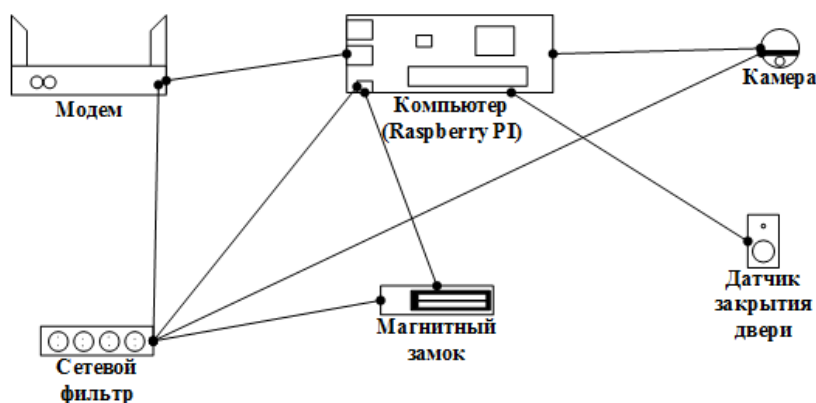


Рис. 3. Аппаратная часть микромаркета

Алгоритм YOLOv8 был выбран из-за его высокой скорости работы и точности детекции объектов.

После открытия дверцы микромаркета камера передает видеопоток на сервер, где YOLOv8 обрабатывает изображения, выделяя и классифицируя товары, взятые клиентом. Это позволяет системе минимаркета автоматически регистрировать, какие

товары были взяты покупателем, что значительно ускоряет процесс покупки и дает возможность клиентам брать нужные товары самостоятельно.

Для успешного применения YOLOv8 в системе минимаркета необходимо было подготовить качественный датасет с изображениями товаров. При разметке использовался инструмент с открытым исходным кодом CVAT [3]. В процессе работы был создан специализированный набор данных, включающий иллюстрации товаров в различных ракурсах и условиях освещения. Это позволило модели обучиться на множестве сценариев и повысить свою точность при детекции.

С целью оценки качества модели использовались метрики Precision, Recall и F1 Score [4]. Итоговые результаты составили 0,95, 0,93 и 0,94 соответственно. Высокие значения этих метрик гарантируют, что система будет распознавать товары с минимальной погрешностью.

2. РАСПОЗНАВАНИЕ И СЕГМЕНТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Вторая часть статьи посвящена изучению методов нейросетевого распознавания и оценки положения объектов. Задачи охватывают применение нейросетевых архитектур YOLOv8 и U-Net для решения вопросов детекции и семантической сегментации, а также разработку подхода для оценки расстояния до реальных объектов на основе их 3D-моделей.

Целью данной работы являлась разработка и оценка эффективности методов машинного обучения для распознавания объектов и семантической сегментации.

2.1. Применение YOLOv8 для распознавания простейших фигур различных форм

YOLOv8 была выбрана для распознавания простейших фигур (детских игрушек) как одна из самых точных и быстрых нейросетевых моделей, с помощью которой осуществляют детекцию объектов. Основной задачей на данном этапе исследования была разработка системы, которая способна распознавать и классифицировать игрушки различных форм (круглые, квадратные и треугольные) по представленным изображениям.

Для обучения модели был подготовлен специальный набор данных, содержащий фотографии игрушек, снятых с разных углов и на различном фоне (рис. 4). Аннотации изображений производились с использованием инструмента Roboflow [5], что позволило четко обозначить контуры объектов и создать обучающий датасет высокого качества. Модель YOLOv8 прошла обучение на указанном наборе данных и показала высокие результаты во время тестирования (рис. 5).

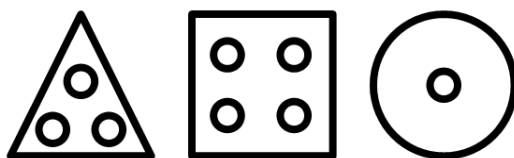
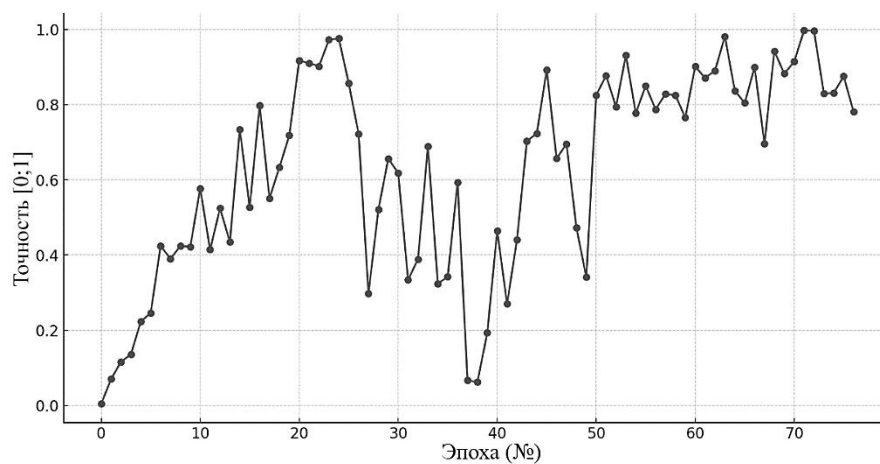
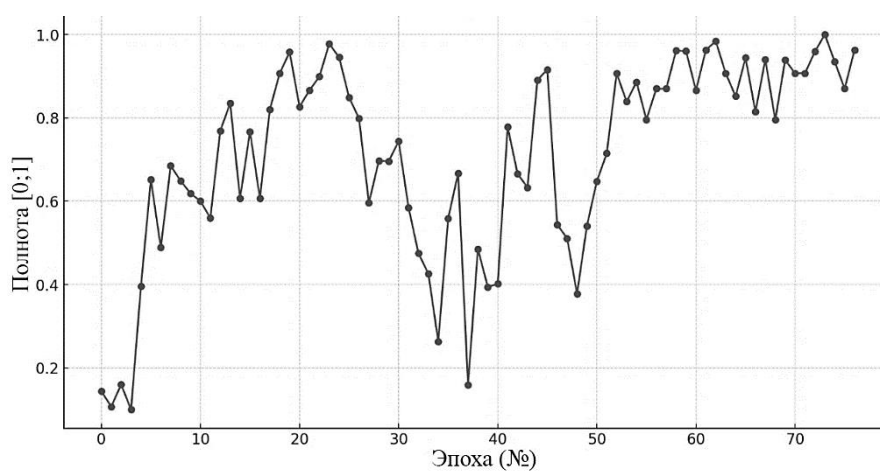


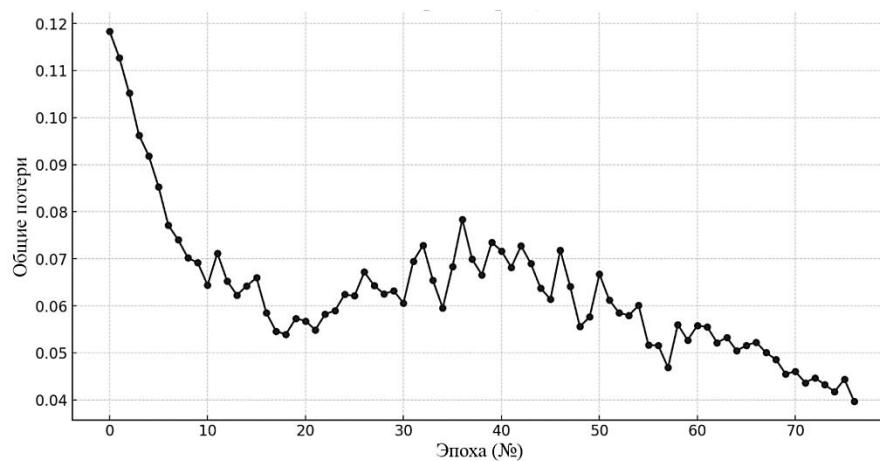
Рис. 4. Примеры фигур для распознавания



(а)



(б)



(в)

Рис. 5. Результаты обучения модели: динамика изменений точности (а) и показателя полноты (б); общие потери за каждую эпоху (в); динамика изменения средней точности предсказаний (г)

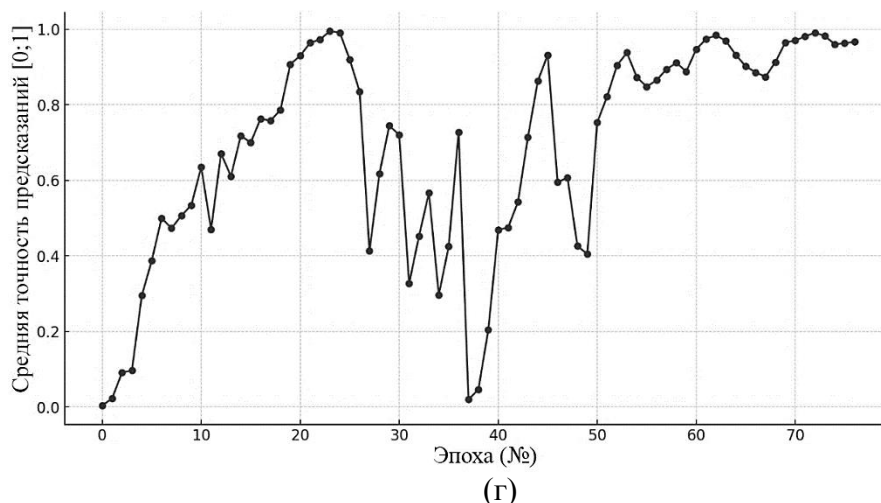


Рис. 5. Продолжение

Во время работы модель успешно распознавала объекты на изображениях, характеризующихся варьирующимся освещением и сложным фоном, что подтвердило ее надежность при функционировании в действительности. Благодаря своей архитектуре YOLOv8 обеспечивает детекцию объектов в режиме реального времени, что делает ее удобной для применения в системах мониторинга и инвентаризации.

2.2. Семантическая сегментация 3D-моделей с помощью U-Net

На следующем этапе исследования была применена модель U-Net, которая показала себя в качестве эффективного решения задач, требующих точного выделения контуров и сегментов объектов.

Основной целью на данном этапе было изучение потенциала использования алгоритмов семантической сегментации для анализа искусственно созданных объектов, что даст возможность оценить их результативность при работе с виртуальными моделями.

Для формирования 3D-моделей различных объектов (таких как гайка, стержень, опора) задействовали программное обеспечение «КОМПАС-3D» [6]. Модели были визуализированы в Blender [7] (рис. 6), что обеспечило получение изображений объектов с различных ракурсов и в разных условиях освещения.

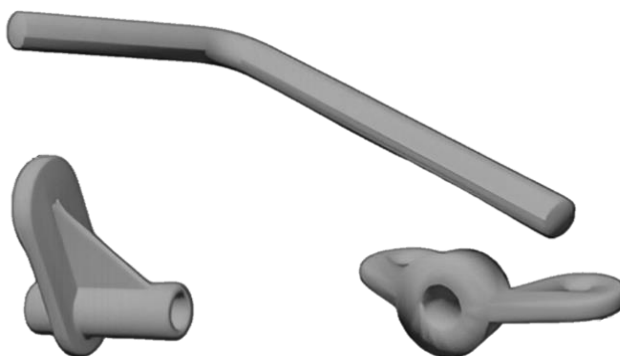


Рис. 6. Представление объектов в Blender

Для обучения модели U-Net использовался аннотированный датасет, в котором были обозначены все части и особенности формы каждого объекта. Благодаря уникальной архитектуре U-Net модель способна точно определять границы объектов и классифицировать их, что подтверждает ее эффективность при работе с виртуальными 3D-моделями (рис. 7).

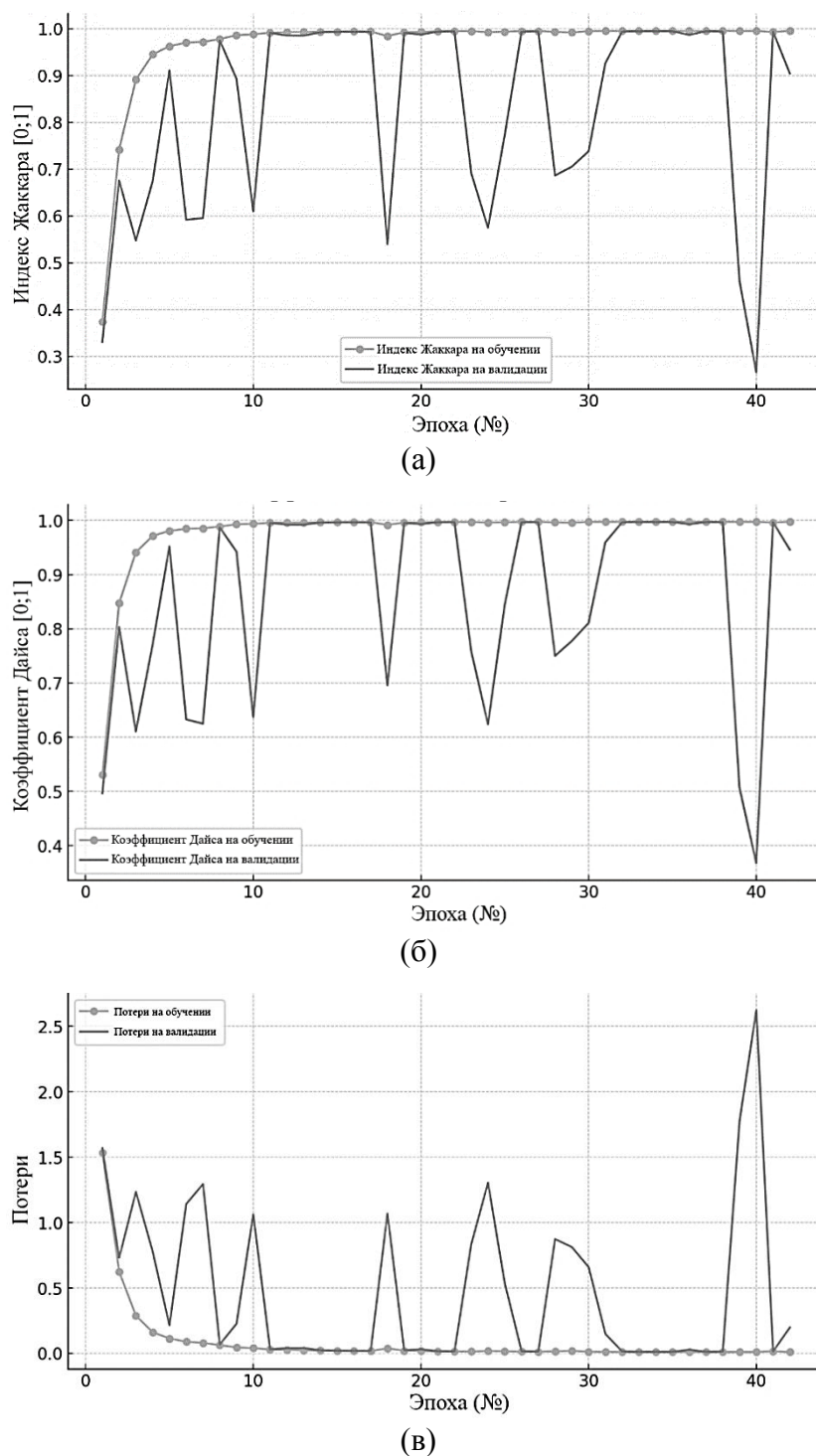


Рис. 7. Результаты обучения модели: график индекса Жаккара (а); коэффициента Дайса (б); потерь (в)

2.3. Семантическая сегментация и нахождение расстояния до реальных деталей на основе 3D-моделей

Далее были использованы результаты сегментации 3D-моделей при работе с реальными объектами. Этот процесс включал адаптацию моделей к условиям реальных съемок и определение расстояний до объектов на основе их визуального представления. В качестве объектов были выбраны реальные детали, такие как рым-гайки и мебельные уголки. Для создания цифровых копий указанных деталей были применены 3D-модели, полученные с помощью программного обеспечения «КОМПАС-3D» (рис. 8).



Рис. 8. Модель и реальная рым-гайка М8

Были исследованы также модели ResUNet [8] и VGG-UNet [9]. Первичное тестирование и анализ выявили необходимость доработки набора данных по причине неудовлетворительных итогов. После нее указанный набор стал давать хорошие результаты (рис. 9).

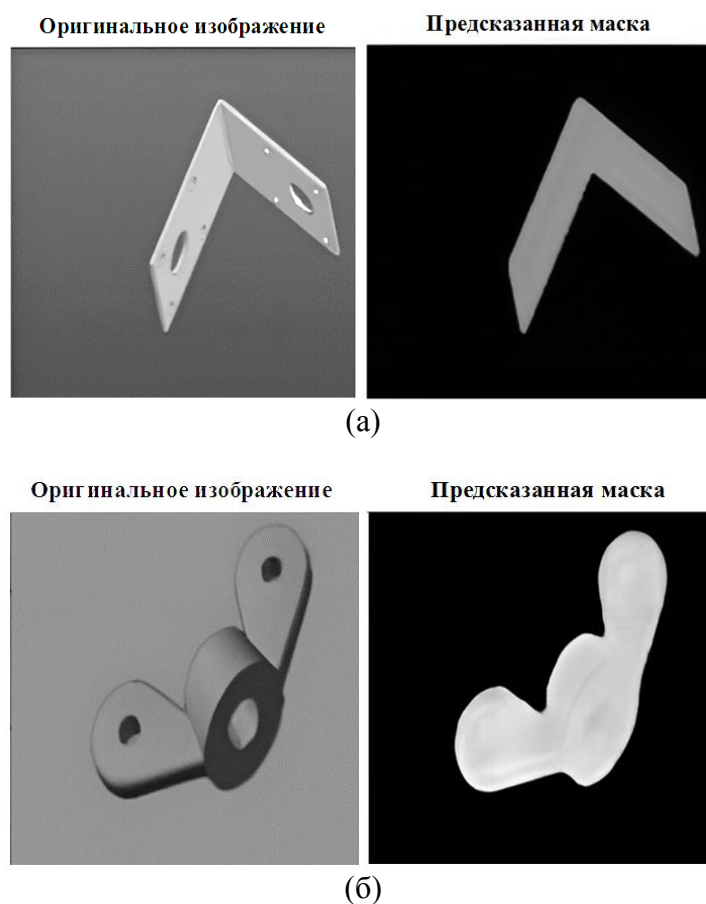


Рис. 9. Распознавание детали, отрисованной в программе «КОМПАС-3D» (а); и детали, отрисованной в той же программе (дополнительный пример) (б)

Заключительным шагом на данном этапе стало определение расстояния до предмета, находящегося на плоскости. Для этого использовался метод триангуляции, основанный на знании высоты камеры относительно стола и угла ее наклона.

Расчет расстояния выполнялся с применением геометрических формул, учитывающих высоту камеры и угол наклона. Это позволило модели не только определить класс объекта, но и оценить его положение в пространстве, что важно для создания систем, способных функционировать в реальных условиях.

С целью нахождения центра массы выделенной маски объекта использовали моменты изображения. Это дало возможность определить координаты центра объекта на изображении. Вычисление моментов осуществлялось с помощью функции `cv2.moments`, которая предоставляет требуемые данные для нахождения координат центра массы ($center_x$, $center_y$).

Поскольку объект может находиться в любом месте изображения, необходимо рассчитать угловые смещения относительно центра изображения по горизонтальной и вертикальной осям ($angle_offset_x$, $angle_offset_y$). Эти смещения зависят от положения центра объекта и размеров иллюстрации (рис. 10).

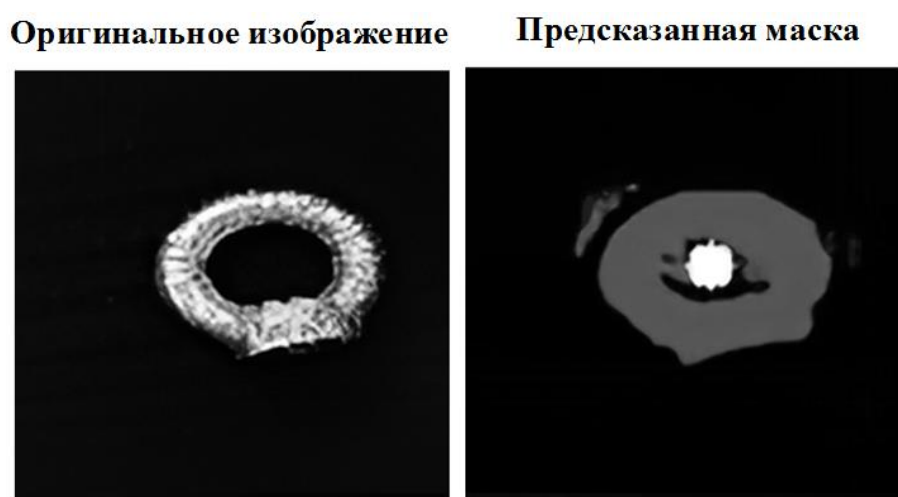


Рис. 10. Результаты распознавания расстояния до детали: горизонтального (28,26 см), прямого (39,98 см) (центр объекта находится в координатах (135, 120))

С учетом смещений производилась корректировка исходного угла наклона камеры ($angle_degrees$) для получения новых углов ($angle_radians_x$, $angle_radians_y$). Эти углы учитывали фактическое положение объекта на изображении.

Для каждого из скорректированных углов рассчитывались горизонтальные и прямые расстояния до объекта. Горизонтальное расстояние (d_x , d_y) определяли с использованием функции тангенса:

$$d = h \cdot \operatorname{tg} \theta,$$

где h – высота камеры; θ – угол наклона камеры.

Прямое расстояние (D_x , D_y) находили, применяя функцию косинуса:

$$D = \frac{h}{\cos \theta}.$$

Итоговые горизонтальное и прямое расстояния получали путем объединения рассчитанных компонент по осям x и y :

$$horizontal_distance = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}, \quad direct_distance = \sqrt{D_x^2 + D_y^2}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Были получены результаты решения четырех задач:

1. Автоматизации работы минимаркета, где представлено интересное решение с использованием детектирования на изображении.
2. Детектирования простейших фигур на изображении.
3. Создания 3D-модели деталей, обучения и тестирования модели на фотографиях деталей.
4. Исследования возможностей анализа пространственных объектов.

Эти результаты подтвердили, что важно использовать высококачественные, разнородные данные для успешного обучения моделей машинного обучения и выявили проблемы, имеющиеся у существующих моделей семантической сегментации.

Использованный метод триангуляции позволил точно определить расстояние от камеры до объекта с учетом его положения на изображении и параметров съемки. В итоге была обеспечена высокая точность вычислений.

Примененный к генерации данных с 3D-деталью подход будет включаться в дальнейшие исследования, посвященные оценке 3D-позиции объекта по изображению [10–12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ использования нейросетей для автоматизации торговли, распознавания и сегментации объектов выявил широкий спектр возможностей и эффективных решений задач в реальном времени.

Можно сделать вывод, что YOLOv8 оптимизирует процесс взаимодействия с микромаркетом за счет автоматического распознавания товаров, что ускоряет их приобретение и делает процесс интуитивно понятным для клиента.

YOLOv8 и U-Net позволяют распознавать и сегментировать объекты, обеспечивая детальную оценку их положения и формы. Это делает их полезными для снятия различных прикладных вопросов, когда нужно различать и локализовать множество мелких деталей.

Отличительная черта YOLOv8 – универсальность, поэтому эта нейросеть может быть востребована при решении задач детекции в реальном времени. Однако в зависимости от специфики последних и требований к точности могут использоваться различные модификации и версии данной модели. Все примененные подходы демонстрируют значение нейросетевых технологий для автоматизации в сфере торговли, промышленности и других сферах, где необходимо быстро и точно распознавать объекты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Varghese R., Sambath M. YOLOv8: A Novel Object Detection Algorithm with Enhanced Performance and Robustness. URL: https://www.researchgate.net/publication/380840426_YOLOv8_A_Novel_Object_Detection_Algorithm_with_Enhanced_Performance_and_Robustness (дата обращения: 22.01.2025).

2. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. URL: <https://arxiv.org/pdf/1505.04597> (дата обращения: 22.01.2025).

3. CVAT.ai Corporation. (2023). Computer Vision Annotation Tool (CVAT) (Version 2.25.0) [Computer software]. URL: <https://github.com/cvat-ai/cvat> (дата обращения: 22.01.2025).

4. Powers D. Evaluation: From precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. URL: https://www.researchgate.net/publication/276412348_Evaluation_From_precision_recall_and_F-measure_to_ROC_informedness_markedness_correlation (дата обращения: 22.01.2025).

5. Roboflow. Roboflow Python Package [Computer software]. URL: <https://github.com/roboflow/roboflow-python> (дата обращения: 22.01.2025).

6. Слепова С.В., Шахина М.А. Система автоматизированного проектирования Компас-3D (Мультимедийный Курс Лекций) // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014. № 3 (часть 2). С. 207–208.

7. Коротцов И.Г., Казанкова А.А. Сравнительный анализ программного средства Blender для 3D-моделирования // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. 2021. Т. 3. С. 1268–1270.

8. Jha D., Smedsrud P.H., Riegler M.A., Johansen D., Lange T., de , Halvorsen P., Johansen H.D. ResUNet++: An Advanced Architecture for Medical Image Segmentation. URL: https://www.researchgate.net/publication/337337131_ResUNet_An_Advanced_Architecture_for_Medical_Image_Segmentation (дата обращения: 22.01.2025).

9. Daniel J., Rose J.T., Vinnarasi F.S., Rajinikanth V. VGG-UNet/VGG-SegNet Supported Automatic Segmentation of Endoplasmic Reticulum Network in Fluorescence Microscopy Images. URL: https://www.researchgate.net/publication/361179414_VGG-UNet_VGG-SegNet_Supported_Automatic_Segmentation_of_Endoplasmic_Reticulum_Network_in_Fluorescence_Microscopy_Images (дата обращения: 22.01.2025).

10. Толстель О.В., Ширкин А.Е., Калабин А.Л. Проецирование технических объектов на изображении в метрическое пространство при помощи глубоких нейронных сетей для задачи детектирования // *Программные продукты и системы*. 2020. Т. 33. № 3. С. 464–470.

11. Толстель О.В., Ширкин А.Е., Калабин А.Л. Построение системы технического зрения для выравнивания содержимого упаковок дельта-манипулятором на пищевом производстве // *Программные продукты и системы*. 2023. Т. 36. № 2. С. 197–206.

12. Ширкин А.Е., Калабин А.Л., Толстель О.В. Оценка 6D-позиции объекта с выбором целевого объекта на изображении для робототехнических задач // *Гибридные и синергетические интеллектуальные системы: Сборник статей по материалам VII Всероссийской Поспеловской конференции* / отв. ред. А.В. Колесников. СПб.: РХГА, 2024. С. 391–398.

Для цитирования: Гуляев С.А., Тарачков М.В., Толстель О.В., Ширкин А.Е. Распознавание и оценка расположения объектов при помощи нейронных сетей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 66–77.

RECOGNITION AND ASSESSMENT OF THE LOCATION OF OBJECT USING NEURAL NETWORKS

S.A. GULYAEV, Postgraduate, M.V. TARACHKOV, Cand. Sc.,
O.V.TOLSTEL, Cand. Sc., A.E.SHIRKIN, Lecturer

Immanuel Kant Baltic Federal University,
14, Alexander Nevsky str., Kaliningrad, 236041, e-mail: shirkin39@mail.ru

A practical basis for the implementation of 3D position assessment has been developed. The first part of the article analyzes the minimarket automation system that uses YOLOv8 to recognize products. In the second part, methods of object recognition and segmentation are investigated: the use of YOLOv8 models for object recognition and U-Net for semantic segmentation of 3D models. It is concluded that these works are components for solving the problem of 3D position estimation and represent an overview of solutions to several small problems using neural networks.

Keywords: neural networks, YOLOv8, U-Net, object recognition, localization, image segmentation, automation, minimarket, detection.

Поступила в редакцию/received: 30.01.2025; после рецензирования/revised: 05.02.2025;
принята/accepted: 10.02.2025

УДК 65.011.5

МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

С.В. РЕПИН, асп., С.А. ТЯСТО, канд. техн. наук

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
127055, Москва, пер. Вадковский, 3А, e-mail: s.tyasto@stankin.ru

© Репин С.В., Тясто С.А., 2025

Рассмотрена функциональная модель процесса оптимизации технологического процесса. Выделены основные характеристики подпроцессов. Описаны алгоритм решения задач оптимизации структуры работ в технологическом процессе, метод оптимального планирования.

Ключевые слова: управление технологическими процессами, оптимизация, функциональная модель, алгоритм поиска, дерево метода Монте-Карло.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-77-86

ВВЕДЕНИЕ

По мере развития организаций и их структуры перед руководителями возникает множество новых задач, которые необходимо решать. Одной из таких задач может быть эффективная организация процессов внутри технологического процесса.

При формировании действенного технологического процесса необходимо учитывать и организовывать вложенные технологические процессы, некоторые части

которых могут быть выполнены в каких-то других отделах предприятия либо на территории других компаний. Возникает необходимость в распределении отдельных действий внутри предприятий, университетов, заводов и пр. Для таких объектов должны учитываться собственные задачи при осуществлении процессов организации и планирования.

В управлении технологическими процессами также могут находить применение различные системы, большинство из которых не имеет встроенной поддержки для реализации автоматического планирования работ в технологическом процессе. Требуется такой программный продукт, который легко можно внедрить в уже существующую глобальную информационную систему предприятия. Следовательно, должен стать более прозрачным и удобным электронный документооборот между различными отделами внутри одной компании, при взаимодействии с другими предприятиями, на которых выполняется какая-то часть общего технологического процесса. Используя такое программное средство, компании смогут достигнуть желаемых показателей эффективности при организации планирования существующих технологических процессов.

Должна увеличиться скорость выполнения полного планирования технологического процесса при внесении изменений в определенные его части. Таким образом повысится производительность, а затраты на реализацию трудоемкого ручного процесса уменьшатся.

В рамках организации должен быть облегчен процесс осуществления управленческой деятельности, а также взаимодействия между различными отделами, которые могут участвовать в реализации отдельных задач в технологическом процессе.

Наличие возможности выполнить процесс по наглядному анализу текущего состояния технологического процесса в сопоставлении с исходным предоставит сотрудникам, которые задействованы в процессе управления технологическими процессами, и руководителям вариант внесения дополнительных правок в структуру технологического процесса в режиме реального времени.

МЕТОД И АЛГОРИТМ АВТОМАТИЧЕСКОГО КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

В большинстве версий программных продуктов, с помощью которых управляют технологическими процессами и которые поставляют на рынок, отсутствует функционал, который давал бы возможность произвести процесс автоматического квазиоптимального планирования работ в вышеуказанных процессах.

Под оптимизацией понимается максимизация выгодных характеристик и одновременное уменьшение расходов. До ее начала необходимо задать критерии оптимальности, т. е. параметры, которые могут оказывать влияние во время осуществления поставленного процесса, а также изменения, с помощью которых можно воздействовать на эффективность этого процесса. Нужно также проанализировать технологический процесс и составить математическую модель процесса, который следует улучшить.

Были реализованы проектирование и разработка функциональных моделей процесса оптимизации технологического процесса (рис. 1).

Функционирование системы автоматического квазиоптимального планирования работ в технологическом процессе может быть разбито на четыре функциональных блока:

- 1) создание технологического процесса в электронном виде;
- 2) конвертирование данного процесса в требуемый вид;

- 3) валидация работ;
- 4) оптимизация работ (рис. 2).

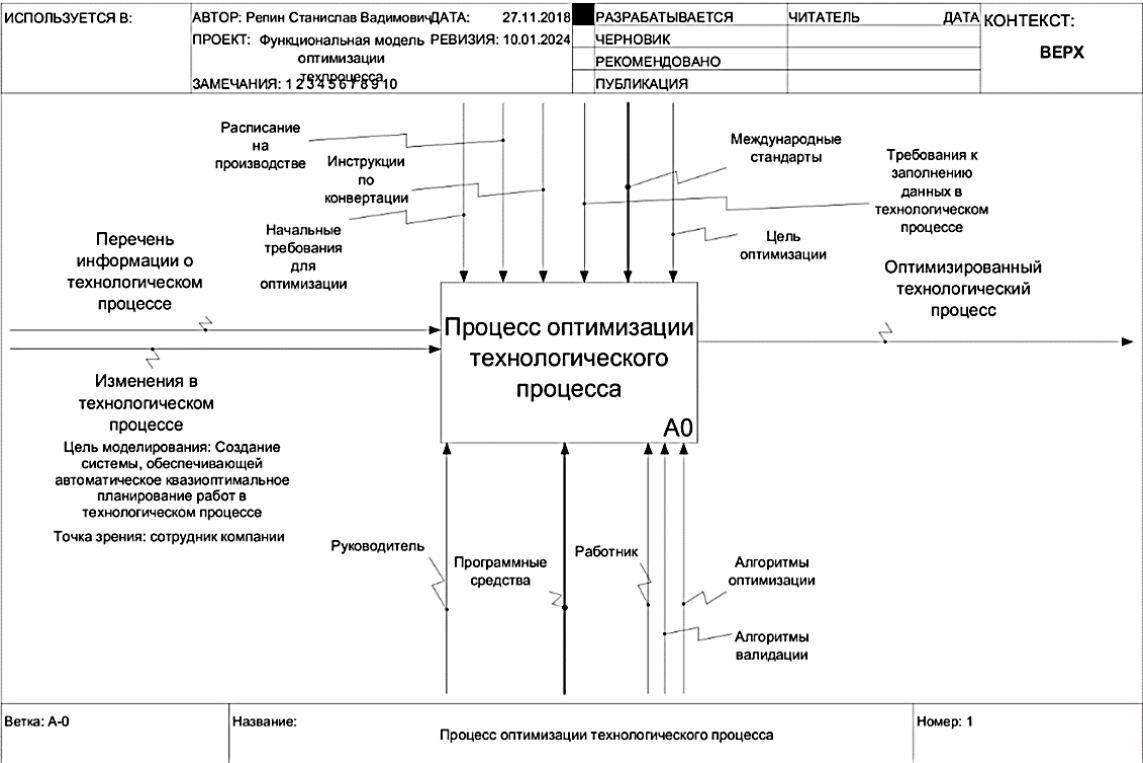


Рис. 1. Контекстная диаграмма

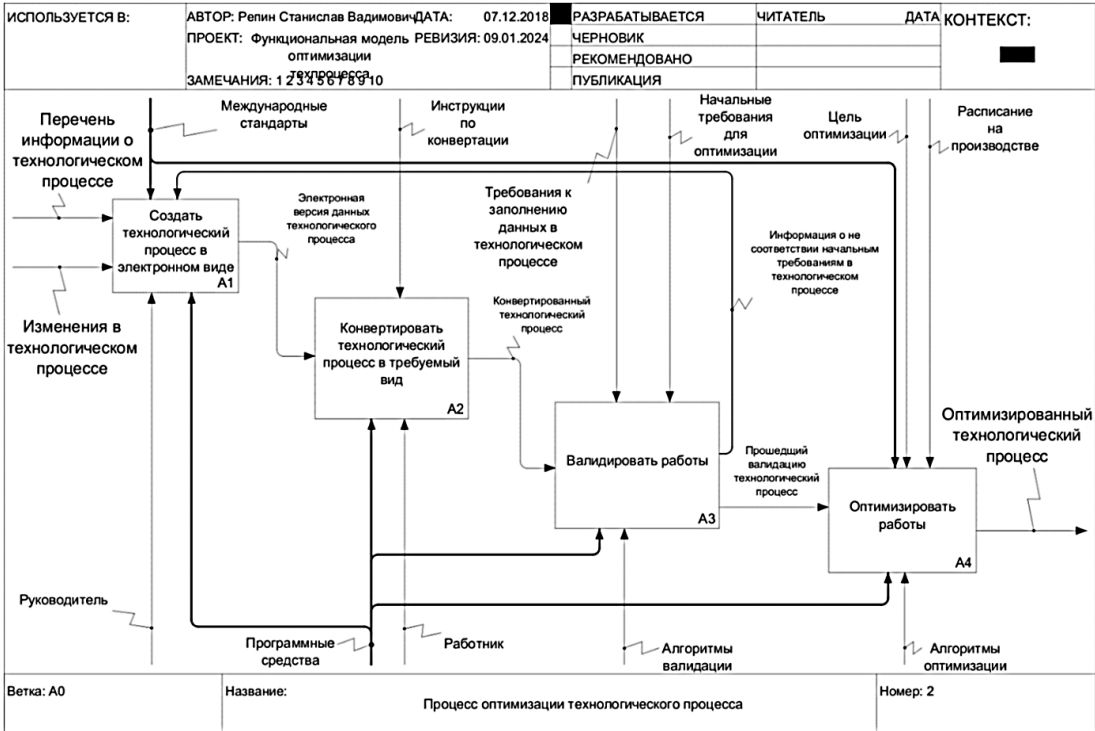


Рис. 2. Диаграмма процессов системы автоматического квазиоптимального планирования работ в технологическом процессе

Блок оптимизирования работ состоит из трех этапов (рис. 3):

- 1) проверки технологического процесса,
- 2) обработки этого процесса,
- 3) перевода технологического процесса в требуемый вид.

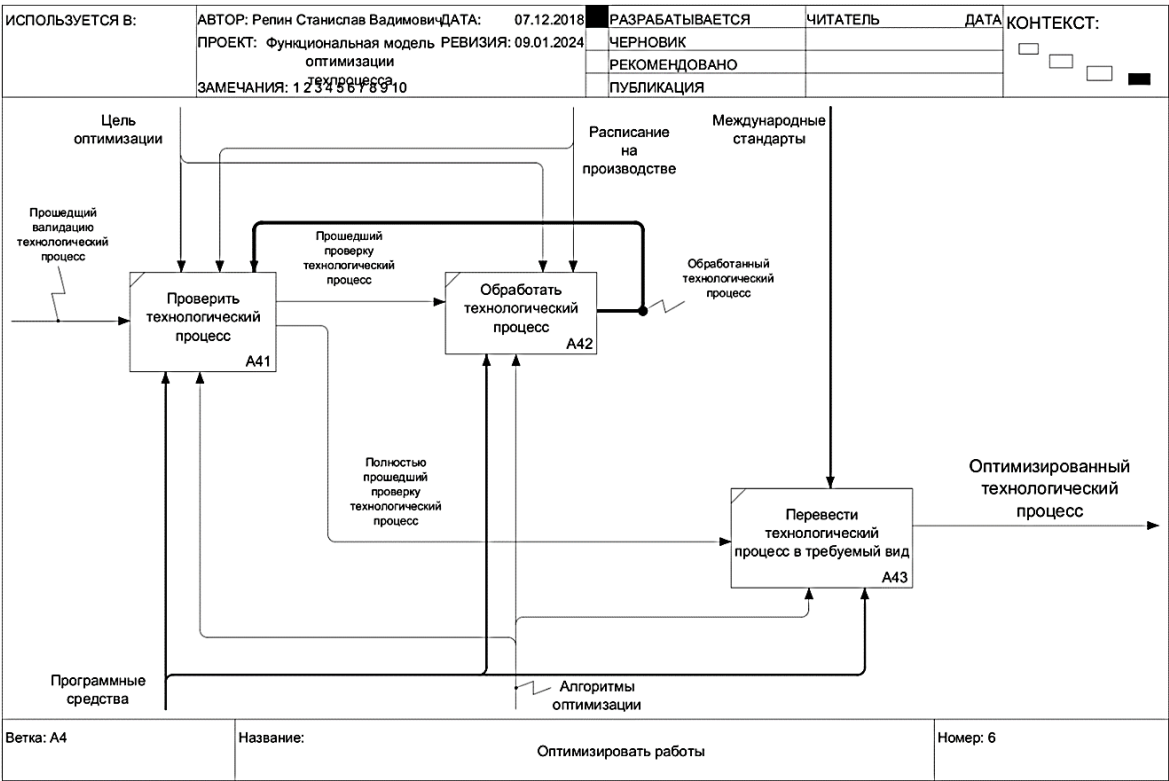


Рис. 3. Диаграмма процессов блока «Оптимизировать работы»

Технологические процессы предназначены для реализации конкретного и четко установленного класса задач, поэтому итоги функционирования этих процессов могут быть оценены с помощью параметров, которые нужно отобрать с учетом степени достижения цели, которая поставлена перед процессом. Эффективность управления может быть определена с помощью корректного отбора и обоснования данных характеристик [1].

Многочисленность показателей, с помощью которых оценивают комплексные системы, служит отличительным свойством таких систем. В основном может производиться уменьшение количества частных учитываемых параметров либо задействоваться косвенные, применять которые можно вместо некоторого числа частных.

Способами снижения количества учитываемых частных характеристик эффективности являются поиск какой-либо обобщенной функции, а также задействование ее для реализации особенностей итогов работы комплексной технической системы. Решение задачи управления процессом становится более простым, если рассматривать единственную, обобщенную характеристику результативности, с помощью которой производится количественная оценка каждого из условий и требований, предъявляемых к итогам функционирования процесса.

В большинстве практических ситуаций поиск данных обобщенных значений не может осуществляться формальными математическими методами и является творческой задачей выбора наилучшего показателя для подведения итогов выполнения технологического процесса. Создание обобщенной характеристики качества выпол-

нения процесса может быть упрощено только тогда, когда существует функциональная связь между частными критериями $F_1(x), \dots, F_m(x)$, учитывая которую возможно установить математическую функцию $F(x) = F[F_1(x), \dots, F_m(x)]$.

Оптимизация технологического процесса должна происходить с учетом деятельности всех представителей разных его направлений. Обычно есть возможность приглашать независимых специалистов, которые не связаны с продвижением какого-то конкретного мнения во время оптимизации [2].

Осуществление моделирования и оптимизации технологических процессов может помочь в достижении следующих целей:

1. Расширения ассортимента формируемой продукции.
2. Увеличения объемов производства.
3. Уменьшения себестоимости при формировании изделий.
4. Выполнения требований экологов и инвесторов.
5. Повышения качества формируемой продукции.
6. Исключения процессов и объектов, из-за которых происходит снижение рентабельности.

Модернизация должна происходить постоянно, так как при единовременном выполнении данного процесса возникшие проблемы могут быть сняты только на какой-то определенный отрезок времени. Непрерывные увеличение заработной платы сотрудников и цен на сырье, устаревание оборудования вызывают уменьшение значений показателей рентабельности.

Рациональность применения различных алгоритмов для оптимального управления может быть оценена только с учетом полученных итогов снятия каких-либо реальных задач. Формирование новых методов оправдано при условии, что они будут эффективны во время применения в значительном количестве практических ситуаций, которые затрудняют использование известных существующих поисковых процедур.

Оптимальное решение какого-то процесса может быть отображено решением, которое является по сравнению с прочими потенциальными решениями наиболее приемлемым для выполняемой задачи из-за определенных свойств.

С точки зрения математики вопросы, в которых из ряда разнообразных итогов вычисления выбирается единственное, которое должно будет служить отображением наиболее подходящего варианта, представляют собой задачи нахождения в определенной многомерной области D возможных значений точки $M(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$. В этой области сформированная функция $f(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0)$, с помощью которой показывают цель, к которой стремятся при выполнении технологического процесса, принимает наибольшее значение из возможных.

Посредством задействования системы ограничений отображают область с допустимыми значениями:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0; \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0; \\ \dots \\ f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0. \end{cases}$$

Любой элемент $M(x_1, x_2, \dots, x_n)$, который располагается в этой области и для которого имеются координаты, обязательно входящие в допустимые показатели системы, отображает потенциальное решение задачи или план. Для формирования такого решения необходимо найти какую-либо точку, с помощью которой может быть получено минимальное или максимальное значение целевой функции с учетом установленной цели оптимизации технологического процесса [3].

Принимая во внимание нелинейность и линейность какой-либо функции цели, а также набор ограничений, можно отразить задачи осуществления оптимального процесса планирования с нелинейной или линейной функцией, а также нелинейным или линейным набором ограничений.

Множество проблем в управлении и экономике производства относится к реализации задач об оптимальном планировании. На данный момент накоплено большое количество опыта, связанного с реализацией указанных задач, а также сформированы методы решения данных задач посредством применения прочих дисциплин.

Задачи об оптимальном планировании включают в себя экстремальные задачи, которые уже содержатся в математике. Уникальной особенностью является то, что при поиске решения этих задач задействуется многомерность области, которая может быть представлена сложным типом формы.

Изредка связанная кусочно-гладкая гиперповерхность может служить пределом области возможных решений. С помощью следующего предиката можно установить принадлежность точки к определенной области:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = (f_1 \geq 0) \wedge (f_2 \geq 0) \wedge \dots \wedge (f_n \geq 0) = \bigwedge_{i=1}^n (f_i \geq 0).$$

Задействуя R-конъюнкцию $x \wedge \alpha y$ вместо расположенного выше предиката, можно применить одно неравенство:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = (\dots (f_1 \wedge \alpha f_2) \wedge \alpha \dots) \wedge \alpha f_n \geq 0.$$

Посредством семейства гиперповерхностей, которые могут быть заданы уравнением $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c$, при $c = 0$ может быть отображено расположение этих семейств в пределах области возможных решений; при $c < 0$ в них будет включена данная область, а при $c > 0$ они будут располагаться в пределах данной области.

В процессе поиска решения задачи об оптимальном планировании должен быть произведен поиск такой точки, с помощью которой можно было бы представить наибольший или наименьший показатель у целевой функции, в данной области, которая может быть отображена неравенством. Уравнение $Z(x_1, x_2, \dots, x_n) = c = \text{const}$ представляет собой уравнение семейства гиперповерхностей уровня целевой функции $Z = Z(x_1, x_2, \dots, x_n)$. У данного семейства может быть сформировано различное положение относительно определенной области, следовательно, для точки, которая отображает оптимальный вариант решения, может быть получено расположение на границе данной области или внутри нее. В данных типах задач может быть выделено бесконечное множество вариантов решения. С помощью анализа отдельных областей можно выделить точки локального экстремума, для которых выполняется неравенство

$$Z(x_1, x_2, \dots, x_n) > Z(x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \dots, x_n^{(i)}).$$

Таким образом, для задачи об оптимальном планировании могут быть найдены некоторые локальные экстремумы на границах области и внутри нее.

В качестве метода Монте-Карло может приниматься совокупность численных методов, которые базируются на получении множества реализаций стохастического процесса, разрабатываемого таким образом, чтобы его вероятностные показатели совпадали с подобными значениями в решаемой задаче.

В ходе развития данных методов появился алгоритм осуществления поиска по дереву методом Монте-Карло, который эффективен при решении задач нахождения оптимального хода в различных играх. Потенциальные перемещения могут быть

отображены посредством формирования дерева поиска. При этом для произведения процесса оценки долгосрочных возможностей по всем перемещениям реализуется множество случайных симуляций. При функционировании данного метода осуществляется множественная генерация моделей потенциальных итогов. При обыгрывании данных моделей все параметры, характеризующиеся неопределенностью, могут быть замещены областью значений случайных показателей, которые будут соответствовать условиям поставленной задачи. Затем может быть произведено многократное вычисление итогов. Во время выполнения последующих итераций должна быть сформирована случайная величина, а потом еще раз необходимо выполнить моделирование ситуации.

Посредством описанного подхода может быть осуществлено множественное воспроизведение конкретной ситуации, которое в реальной жизни не может быть выполнено и благодаря которому вероятность становится уже относительно детерминированной, а также происходит формирование обстановки, отображающей усредненное положение дел, а такую обстановку возможно предсказать. В связи с тем, что данная ситуация будет предсказуемой, можно будет вычислить ее числовые показатели. Отметим, что для получения возможности формирования приближенного результата с какой-то установленной точностью необходимо выполнить достаточное количество испытаний [4].

Могут быть отображены следующие основные шаги осуществления вышеописанного алгоритма:

1. Определение области применения случайных показателей в рамках задачи.
2. Выполнение разыгрывания случайной величины и дальнейшее ее применение в расчетах задачи.
3. Множественное повторение вычислений задачи, а также сохранение итогов.
4. Произведение процесса оценки сформированного решения.

Чтобы разнообразить игры, при формировании описания функционирования искусственного интеллекта этим методом стали пользоваться много лет назад. Цель этого алгоритма может состоять в отборе наиболее выигрышного варианта развития ситуации. Дерево может быть отображено в виде структуры, в которой, кроме указателей и хода, представлено число выигранных и произведенных партий. Данный показатель в этом методе используется при выборе очередного шага [5].

До задействования различных методов поиска оптимального варианта решения для установленной модели должна быть выбрана руководящими лицами некоторая целевая функция, с помощью которой можно было бы отобразить цель, выполнение которой произойдет с помощью оптимизации технологического процесса [6].

Могут быть выделены следующие возможные критерии оптимальности, или варианты целевых функций, относящиеся к осуществлению процесса оптимального планирования технологического процесса:

1. Минимизация длительности оптимизируемого технологического процесса.
2. Сокращение затрат производственных ресурсов.
3. Минимизация продолжительности критического пути оптимизируемого проекта.
4. Максимизация использования существующих ресурсов в технологическом процессе.
5. Максимизация прибыли.

Был разработан алгоритм эффективного планирования работ в технологических процессах, учитывающий требования пользователей (рис. 4).

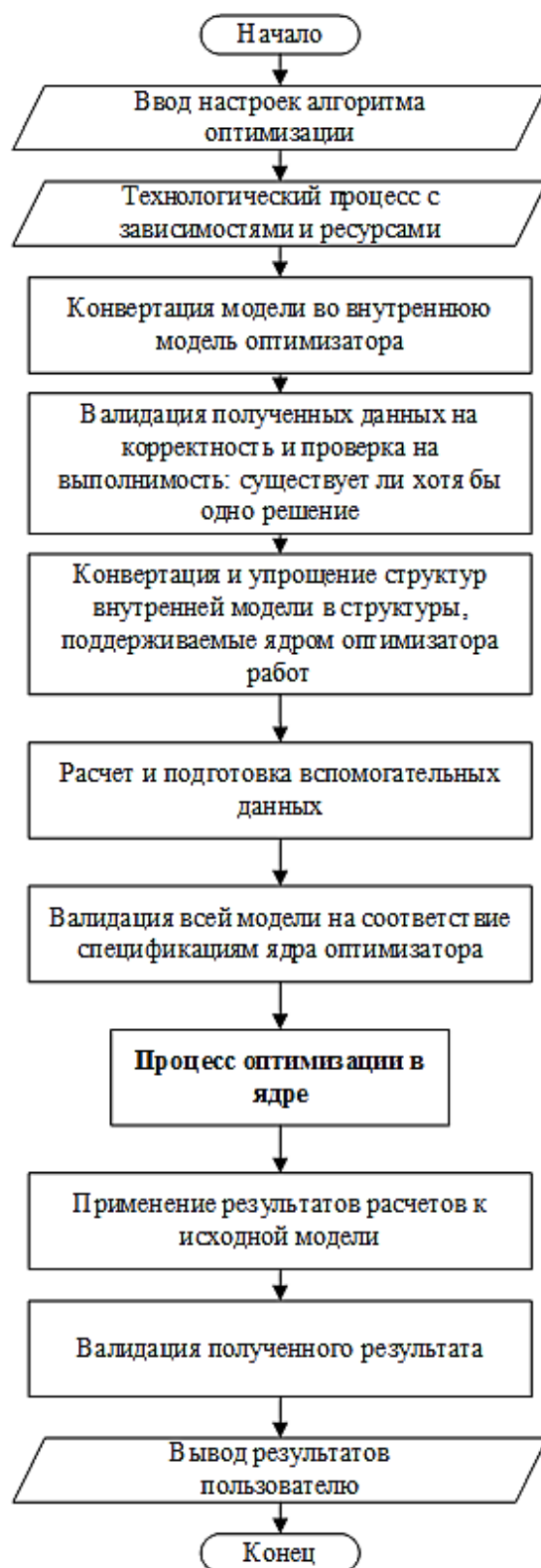


Рис. 4. Алгоритм эффективного планирования работ в технологическом процессе

Был сформирован, помимо этого, алгоритм, в котором представлено описание функционирования предполагаемого ядра будущей системы автоматического квазиоптимального планирования работ в указанном процессе (рис. 5). Во время оптимизации будет задействован усовершенствованный метод Монте-Карло для

осуществления поиска по дереву, т. е. этот метод был настроен для реализации задач в сфере управления технологическими процессами. После применения этого алгоритма в системе сформируется модифицированная структура работ в рамках технологических процессов, в которой учтут разнообразные использованные ресурсы и связи. Как целевая функция будет задействовано уменьшение длительности выполнения всего технологического процесса. Чтобы впоследствии пользователи могли быстро и беспрепятственно изучать итоги, а также выполнять какую-либо корректировку текущего положения дел, нужно предоставлять доступ к системе, в которой можно показывать данные графически, с помощью диаграммы Ганта (этот подход представляет собой один из наиболее распространенных вариантов, а также позволяет сделать более легкой работу с системой).

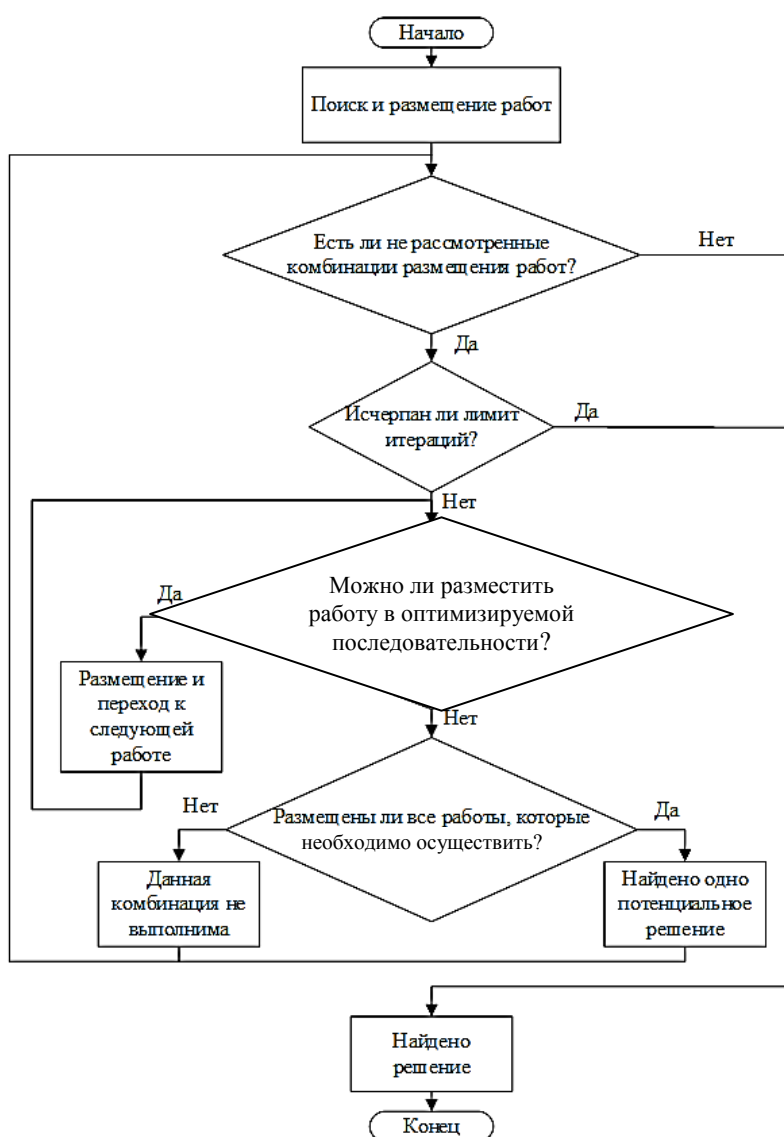


Рис. 5. Алгоритм осуществления поиска квазиоптимального решения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технологические процессы рассмотрели через призму управления проектами. В качестве основного программного продукта, с которым взаимодействует разработанное программное средство, выбрали отечественную разработку «T-FLEX Управление

проектами». Данная система может быть использована для решения задач электронного документооборота; имеет удобный функционал, облегчающий управление проектами, а также предоставляет возможность расширения через подключение каких-либо собственных приложений. Указано, что в ходе взаимодействия сформированного программного средства с исходным технологическим процессом в виде проекта в данной системе выполняется поиск квазиоптимального решения, после чего полученные результаты могут быть применены к исходной модели и изменения внесены в исходную структуру данных технологического процесса. Использование программного средства при осуществлении тестового технологического процесса позволило на 66,7 % сократить время его выполнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сдвижков О.А. Практикум по методам оптимизации: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2015. 198 с.
2. Мастяева И.Н., Горемыкина Г.И., Семенихина О.Н. Методы оптимальных решений: учебник. М.: ИНФРА-М, 2016. 379 с.
3. Зойтендейк Г. Методы возможных направлений / пер. с англ. С.М. Мовшовича; под ред. Д.Б. Юдина. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. 176 с.
4. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1968. 64 с.
5. Жданов А.А. Автономный искусственный интеллект. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 359 с.
6. Альтшуллер Г.С. Найти идею: введение в ТРИЗ – теорию решения изобретательских задач. 4-е изд. М.: Альпина Паблишерз, 2011. 399 с.

Для цитирования: Репин С.В., Тясто С.А. Метод оптимального планирования технологических процессов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 2 (26). С. 77–86.

TECHNOLOGICAL PROCESSES OPTIMAL PLANNING METHOD

S.V. REPIN, Postgraduate, S.A. TYASTO, Cand. Sc.

Moscow State University of Technology «STANKIN»,
3A, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, e-mail: s.tyasto@stankin.ru

A functional model of the process optimization process is considered. The main characteristics of the subprocesses are highlighted. The algorithm for solving problems of optimizing the structure of work in the technological process and the method of optimal planning are described.

Keywords: process control, optimization in process control, functional model, Monte Carlo Tree Search algorithm.

Поступила в редакцию/received: 08.02.2025; после рецензирования/revised: 09.02.2025;
принята/accepted: 17.02.2025

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ АГРЕГИРОВАННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

Е.А. ЗОРИНА¹, канд. техн. наук, В.Г. МЕШКОВ², канд. техн. наук,
М.К. СИМАНЖЕНКОВ², асп.

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт «Центр»,
123242, Москва, ул. Садовая-Кудринская, 11, стр. 1, e-mail: zorina_liza@list.ru

² Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
127055, Москва, пер. Вадковский, 3А, e-mail: mkt3@mail.ru

© Зорина Е.А., Мешков В.Г., Симанженков М.К., 2025

Статья посвящена исследованию воздействия частоты появления отклонений от рабочих состояний станков на значения агрегированных показателей средствами компьютерного моделирования. Подчеркнуто, что результаты расчетов показывают: даже несколько серьезных отклонений не могут существенно повлиять на точность расчета агрегированных показателей.

Ключевые слова: поток состояний, станки, компьютерное моделирование, дискретная функция, плотность распределения, вероятность, абсолютное отклонение, частота появления состояний, точность, расчет, агрегированные показатели.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-87-93

Одной из важнейших задач организации серийного производства является обеспечение его ритмичности при максимально возможной загрузке оборудования. Решению этой задачи способствует применение систем сбора данных о состояниях оборудования (MDC-систем). Данные системы ведут непрерывный мониторинг состояния оборудования (работы по управляющей программе, аварийного останова, технологического останова, организационных простоев (т. е. отсутствия инструмента, задания, заготовок и т.п.)), которые группируются по степени влияния на эффективность производственных процессов. Среди простоев оборудования можно выделить хорошо прогнозируемые производственные, технические, организационные и нерегламентированные, обусловленные влиянием случайных факторов; недоступное время, непосредственно связанное с режимом функционирования агрегатов. Уменьшить воздействие разного рода простоев на выпуск продукции отчасти можно с помощью резервирования оборудования, однако в современных условиях это экономически нецелесообразно и позволяет нивелировать последствия лишь технических простоев (аварий, ремонта станка и т.д.).

Мониторинг состояний машин может вестись разными способами: автоматическим (подразумевает снятие данных о состоянии со стойки числового программного управления; интерпретацию временных параметров потребляемого оборудованием тока, поступающих с токосъемных клещей); вручную, т. е. путем самостоятельного ввода состояния агрегатов оператором в пределах предоставленных прав на терминале MDC-системы (индивидуальном или общем). Вне зависимости от способа получения информации о состоянии оборудования возможно возникновение ошибок, вызываемых несовершенством аналитического аппарата при автоматическом съеме данных, либо человеческим фактором. В то же время для принятия адекватных управленческих решений данные о состоянии работы станков чаще всего оказываются

востребованными при формировании известного набора агрегированных показателей, что в целом должно снижать чувствительность результатов расчета к возможным отдельным отклонениям от рабочих состояний станков. Справедлива постановка задачи об исследовании влияния появления отдельных отклонений от рабочих состояний на рассчитываемые значения указанных показателей с использованием практического материала, собранного благодаря показаниям станков, задействованных в выполнении реальной производственной программы.

Цель работы – определение степени воздействия некорректных значений, содержащихся в выборке производственных данных, на итоги ее анализа. Достижение цели позволит формировать адекватные управленческие решения, основанные на анализе потока информации о состоянии оборудования, поступающей в реальном времени, при наличии в ней допустимого количества ошибочных значений. В этом и заключается актуальность проводимого исследования.

АНАЛИЗ АГРЕГИРОВАННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА

Данные из потока состояний станков информационного пространства динамичные. Условно состояния можно разделить на простые и агрегированные. Более подробная классификация приведена ниже [1]:

Простые состояния	Агрегированные состояния
Ремонт станка	Технический простой
Авария	
Техническое обслуживание	
Наладка станка	Производственный простой
Установка заготовки	
Замена инструмента	
Проверка на тех. точность детали	
Установка крупногабаритной детали	
Межоперационный/окончательный контроль	
Технологический останов	
Отладка управляющей программы	
Уборка станка	
Отсутствие заготовок/полуфабрикатов	Организационный простой
Отсутствие инструмента/оснастки	
Отсутствие управляющей программы	
Отсутствие задания	
Отсутствие материала	
Ожидание ремонта	
Простой станка	Нерегламентированный простой
Другие работы	
Станок выключен	Неиспользуемое время
Станок остановлен	
Регламентированный перерыв	

Состав перечня простых состояний определяется спецификой конкретного производства и может меняться.

Согласно приведенной классификации неизбежно влияние человеческого фактора в простых состояниях; отклонение от рабочего состояния станков может быть

обнаружено не вовремя, с опозданием, а значит, соответствующие искажения будут присутствовать в расчетных величинах агрегированных показателей. Отсюда можно сделать логичный вывод о важности исследования воздействия частоты появления отклонений от рабочих состояний на абсолютную величину отклонения основных агрегированных показателей по реальным данным, собранным в ходе снятия показаний состояний станков за некоторый отчетный период (в данном случае за три месяца). Наиболее логичным и современным способом такого изучения является компьютерное моделирование. В данной статье представлена часть результатов такого моделирования, имеющих в целом достаточно типичный вид, отражающий общую тенденцию.

В качестве исходных данных для моделирования были использованы выборки информации о наиболее полной и ритмичной загрузке оборудования за три месяца. Экспериментальная база для анализа сформирована на примере расчета значения производственного простоя, зависящего от состояния установки крупногабаритной детали, проверки на технологическую точность, уборки станка; от состояний «другие работы», «обеденный перерыв», «технологический останов», «станок выключен» и «станок остановлен»; от межоперационного/окончательного контроля; от установки заготовки; от отладки управляющей программы, замены полотна; от отрезки дефектного слоя; от организационного простоя, в свою очередь, обусловленного состояниями заготовок/полуфабрикатов, инструмента/оснастки, управляющей программы, задания, отладки указанной программы, материала.

Производственный простой $t_{пп}$ рассчитывается по формуле

$$t_{пп} = \sum_{i=1}^n t_{ппс_i},$$

где $t_{ппс_i}$ – суммарное время простых состояний, отнесенных к группе производственных простоев, за рассматриваемый период времени.

Организационный простой $t_{оп}$ определяется следующим образом:

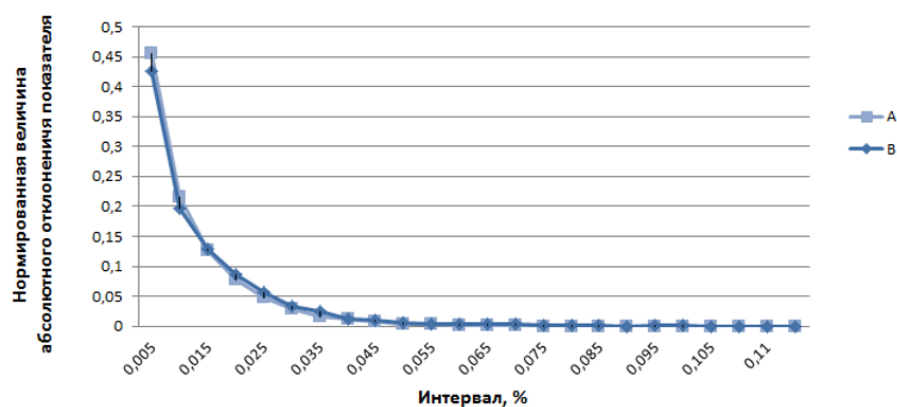
$$t_{оп} = \sum_{i=1}^m t_{опс_i},$$

где $t_{опс_i}$ – суммарное время простых состояний, отнесенных к группе организационных простоев, за рассматриваемый период времени.

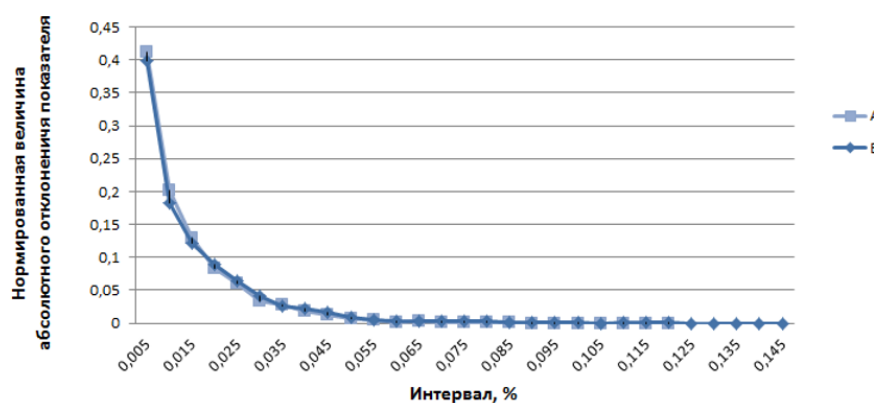
Показатель «производственный простой» для простоты обращения в дальнейшем будет обозначать латинской буквой «А», а «организационный простой» – «В».

При моделировании имеющиеся в базе данных значения частоты появления отклонений от рабочих состояний были приняты в качестве идеальных исходных данных полной и ритмичной загрузки оборудования. Моделирование состояло в том, что в исходные данные специально, намеренно вносили одно или несколько отклонений, искажающих некоторое случайно выбранное числовое поле частоты появления отклонений этих данных. Поскольку значения, существенные для эксперимента, представляют собой в основном положительные ненулевые числа, в качестве модели отклонений было выбрано искажение исходной информации в N раз. Решение о том, увеличивать или уменьшать значение поля, принималось случайно и равновероятно. Такое отклонение называли отклонением, имеющим коэффициент N. Для проведения исследования мы специально взяли несколько значений коэффициента отклонений (0,5; 2,2; 2,5; 2,8; 3,0), чтобы лучше увидеть результаты их влияния на значения агрегированных показателей (в нашем случае «А» и «В»). Для численного эксперимента были намеренно созданы программные средства, позволяющие

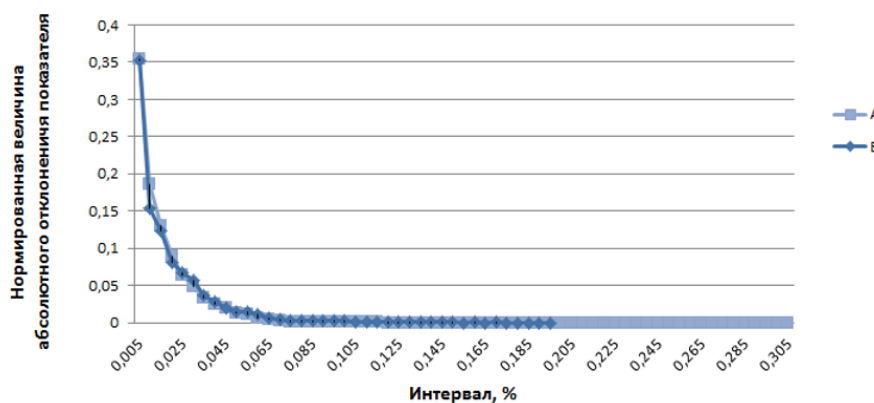
многократно моделировать возникновение случайного искажения в данных. Количество экспериментов со случайным внесением искажения в данные, имитирующих случайные отклонения, составило порядка 10000 (рисунок).



(а)

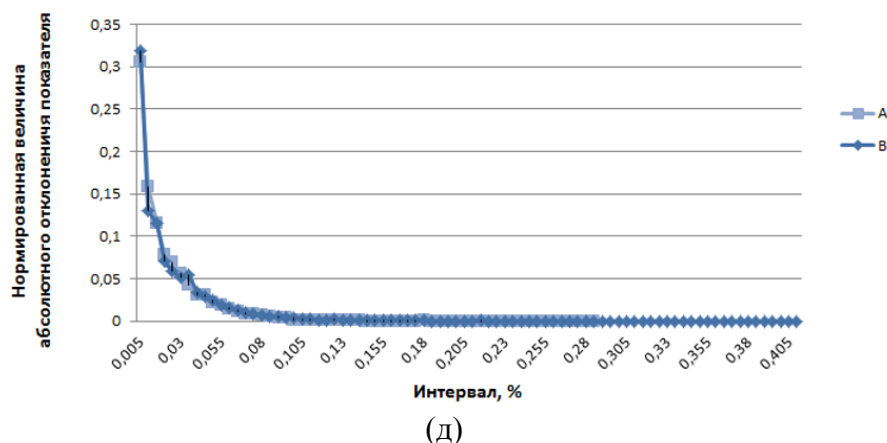
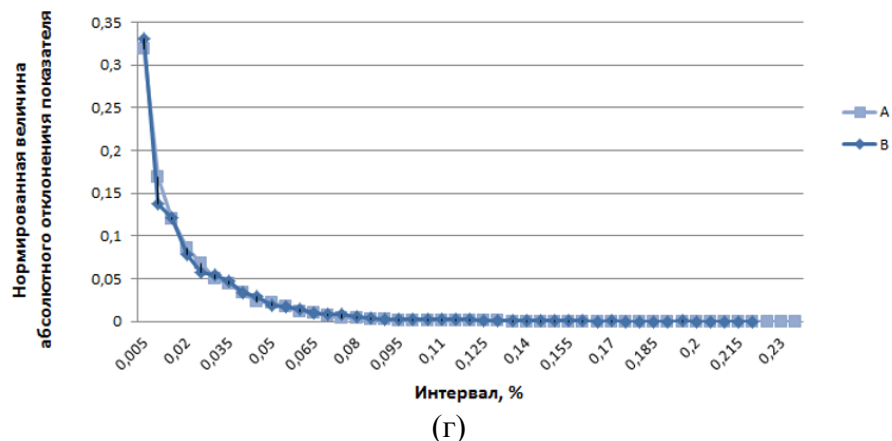


(б)



(в)

Плотность распределения величины абсолютного отклонения показателя для коэффициентов отклонения: 0,5 (а); 2,2 (б); 2,5 (в); 2,8 (г); 3,0 (д)



Окончание

В ходе интерпретации результатов эксперимента получена дискретная функция плотности распределения вероятности абсолютного отклонения выбранных показателей («А» и «В») под воздействием модели коэффициентов случайного отклонения данных от идеальных значений. Рассчитанная плотность распределения (по процентной шкале) приведена на графиках, соответствует разным значениям коэффициента отклонения (см. рисунок).

Полученные результаты оказались неочевидными. Например, выяснилось, что отклонения в 0,5 и 2,2 раза, будучи субъективно весьма ощутимыми, на значения агрегированных показателей влияют удивительно слабо. По крайней мере, для отклонения в 0,5 раз величина отклонений показателей «А» и «В» попадает в интервал 0,03 % с вероятностью 0,953 и 0,925 соответственно. Такие ошибки, по сути, почти эквивалентны величине точности округления, принятой в существующих правилах расчета показателей. Показатель «В», как и все показатели, построенные по похожим формулам, в целом оказался более чувствительным к ошибкам данных, чем «А» и его аналоги. Важным является вывод, что достаточно значимые отклонения, попадающие в интервал 0,05 и более процентов (что составляет критическую величину в рамках принятых критериев точности), характерны лишь для весьма грубых отклонений. В таблице приведена вероятность возникновения таких отклонений для каждого из смоделированных коэффициентов.

Вероятность возникновения отклонений для каждого коэффициента

Коэффициент отклонения по расчетной модели	Вероятность (расчетная) отклонения значения показателя на 0,05 и более процентов	
	Показателя «А»	Показателя «В»
0,5	0,0070	0,0205
2,2	0,0144	0,0300
2,5	0,0348	0,0634
2,8	0,0662	0,0911
3,0	0,0907	0,1129

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное моделирование заставило несколько по-новому взглянуть на появление отклонений от рабочих состояний станков. Выяснилось, что даже наличие нескольких достаточно серьезных отклонений (например, изменение частоты появления некоторого состояния вдвое) не может существенно сказаться на точности определения агрегированных показателей и не столь опасно с точки зрения адекватности расчета указанных показателей, на основе которых принимаются управленческие решения. Это, конечно же, не означает, что эти отклонения не следует выявлять: нужно прилагать максимальные усилия при поиске наиболее грубых отклонений, что в принципе делать менее сложно. Результаты расчетов согласно модели смягчают проблему наличия отклонений от рабочих состояний, снижают уровень пессимизма, возникающего из-за данной проблемы. Влияние этих отклонений на агрегированные показатели чаще всего не выходит за рамки критических допусков. Это позволяет частично пересмотреть и оптимизировать общую концепцию и стратегию контроля рабочих состояний станков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методика оценки и повышения эффективности работы технологического оборудования и производственного персонала. Инструкция к применению. URL: https://intechnology.ru/files/320/2017_metodika-ocenki-effe.pdf (дата обращения: 21.02.2025).
2. Капитанов А.В. Повышение эффективности автоматизированного станочного оборудования на основе моделирования и оптимизации системы технологической подготовки производства: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2009. 195 с.
3. Мешков В.Г., Козлова А.В. Цифровые технологии как основа управления процессами в современном машиностроении // *Актуальные вопросы науки, нанотехнологий, производства: Сборник научных статей 2-й Международной научно-практической конференции*. Курск: ЮЗГУ, 2022. С. 271–273.

Для цитирования: Зорина Е.А., Мешков В.Г., Симанженков М.К. Автоматизированный анализ агрегированных показателей производственного процесса // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 87–93.

AUTOMATED ANALYSIS OF AGGREGATED PRODUCTION PROCESS INDICATORS

E.A. ZORINA¹, Cand. Sc., V.G. MESHKOV², Cand. Sc.,
M.K. SIMANZHENKOV², Postgraduate

¹ All-Russian Scientific Research Institute «Center»,
11, build. 1, Sadovaya-Kudrinskaya str., Moscow, 123242, e-mail: zorina_liza@list.ru

² Moscow State University of Technology «STANKIN»,
3A, Vadkovsky lane, Moscow, 127055, e-mail: mkt3@mail.ru

The article is devoted to the study of the effect of the frequency of deviations from the operating conditions of machines on the values of aggregated indicators by means of computer modeling. It is emphasized that the calculation results show that even a few serious deviations cannot significantly affect the accuracy of the calculation of aggregated indicators.

Keywords: flow of states, machine tools, computer modeling, discrete function, distribution density, probability, absolute deviation, frequency of occurrence of states, accuracy, calculation, aggregated indicators.

Поступила в редакцию/received: 08.02.2025; после рецензирования/revised: 09.02.2025;
принята/accepted: 17.02.2025

УДК 303.732:621.316

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

К.Б. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук, Ю.М. ПАВЛОВА, канд.техн.наук,
М.Б. МАНЬКОВ, асп., Р. ОСЕИ-ОВУСУ, асп.

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

© Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Маньков М.Б., Осеи-Овусу Р., 2025

Рассмотрен подход к построению оптимальной конфигурации электрических сетей, содержащих накопители мощности и объекты альтернативной энергетики. Подчеркнуто, что увеличение доли альтернативной энергетики требует интенсивного использования накопителей мощности на базе аккумуляторных батарей. Указано, что это приводит к значительному усложнению расчетов оптимального состояния энергосистемы с учетом нестационарного характера отдачи и потребления электроэнергии. Предложено применять методы оптимизационного моделирования и системного анализа с элементами прогностических моделей поведения объектов энергосистемы для построения системы управления электросетевым комплексом, что обеспечит поддержание требуемого уровня надежности отпуска электроэнергии потребителям, а также для уменьшения неоптимальных перетоков электрической энергии.

Ключевые слова: система электроснабжения, прогноз, управление, надежность, аккумуляторные батареи, накопители мощности, оптимизация.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-93-103

ВВЕДЕНИЕ

Рост числа проектов альтернативной энергетики в мире приводит к возникновению необходимости в пересмотре алгоритмов построения электрических сетей. В первую очередь данная необходимость связана с увеличением числа генерирующих установок, обладающих малопредсказуемым значением мгновенной отпускаемой мощности (в то время как величина годового отпуска электрической энергии определяется достаточно точно). Из-за этого увеличивается важность системы управления, позволяющей нивелировать большой разброс значений величины отпускаемой в сеть мощности, а также снизить перетоки мощности между территориально удаленными объектами генерации и потребителями. Кроме того, важным становится прогноз величины потребления электроэнергии с выявлением и прогнозированием (предпочтительно краткосрочным и среднесрочным) трендов использования. На ведущие позиции при этом выходят сбор и обработка статистических данных, включающих не только интегрированные значения расхода за длительные периоды времени, но и постоянный мониторинг графиков нагрузки единичных и групповых потребителей, позволяющий выявить в применении паттерны поведения [1].

Предлагается внедрить в системы управления одноранговых сетей электроснабжения, содержащих накопители мощности и генерирующие элементы альтернативной энергетики, программные модули оптимизации перетоков мощности, минимизирующие неэффективные потери электроэнергии при передаче. Такая оптимизация позволит значительно сократить величину неоптимальных перетоков электроэнергии, особенно между накопителями мощности, работающими в противоположных режимах («заряд» и «разряд» соответственно), а также увеличить коэффициент использования источников переменной мощности с сохранением должного уровня резервирования.

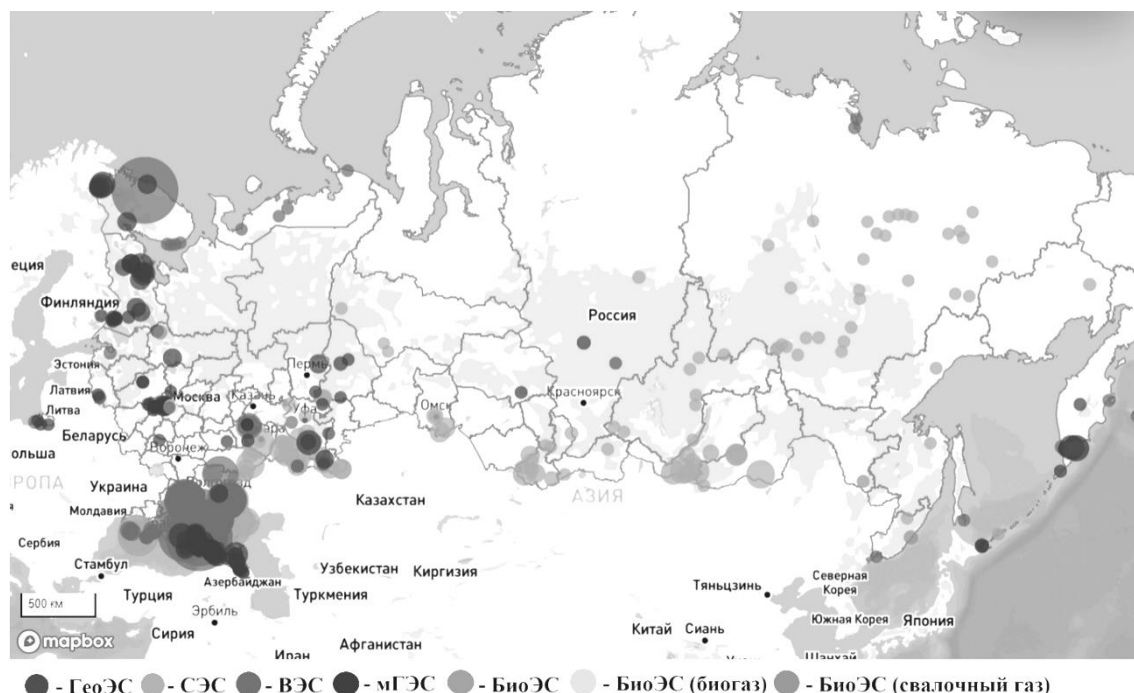
АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩЕЙ СИТУАЦИИ

С АЛЬТЕРНАТИВНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ В РОССИИ И МИРЕ

Следует, несмотря на большой потенциал развития различных видов альтернативной энергетики в России, отметить, что в настоящее время, на начало 2025 г., основные реализованные проекты тяготеют к центрам потребления, включая солнечные электростанции в Якутии, располагающиеся рядом с населенными пунктами.

Такой подход связан с преимущественно низкой единичной мощностью генерирующего оборудования, что делает затраты на передачу электрической энергии на значительные (более 100 км) расстояния необоснованно высокими. С учетом того, что многие объекты, относящиеся к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), находятся на площадях, кратно превышающих занимаемые «классическими» электростанциями сопоставимой мощности, проблема выделения земель может стоять достаточно остро. Дополнительным фактором, ограничивающим распространение малых энергоисточников, является необходимость строительства инфраструктуры связи объекта генерации с энергосистемой, куда входят силовые трансформаторы, выпрямители и (или) инверторы, компенсаторы реактивной мощности, балластные (разрядные) сопротивления, а также резервирующие и балансирующие накопители мощности.

На рисунке показана карта размещения объектов электроэнергетики из возобновляемых источников.



Карта размещения объектов электроэнергетики из возобновляемых источников на территории РФ: ГеоЭС – геотермальные электростанции; СЭС – солнечные электростанции; ВЭС – ветроэлектростанции; мГЭС – малые гидроэлектростанции; БиоЭС (свалочный газ) – биоэлектростанции на основе свалочного газа; БиоЭС (биомасса) – биоэлектростанции на основе биомассы; БиоЭС (биогаз) – биоэлектростанции на основе биогаза [3]

Частично решить проблему инвестиций в строительство позволяет программа стимулирования развития ВИЭ-генерации в Единой энергетической системе (ЕЭС) России за счет гарантированной оплаты мощности по договору о предоставлении мощности (ДПМ) на оптовый рынок, заключенному с владельцем электростанции. Данная программа сокращенно называется ДПМ ВИЭ. Создание специального механизма поддержки генерации ВИЭ на оптовом рынке утверждено Постановлением Правительства РФ № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» [2]. Но стоит отметить, что в настоящее время большая часть оборудования и компонентов для подобных электрических станций производится за пределами РФ, что в условиях санкционного давления со стороны недружественных стран приводит к значительному подорожанию проектов строительства подобных электростанций. Следует сказать и об ограниченности производства некоторых позиций (например, силовых повышающих трансформаторов) как в России, так и за ее пределами. Обычно такое оборудование производится ограниченными партиями и в рамках определенных проектов (кроме типовых понижающих трансформаторов для распределительных сетей), что может значительно (до нескольких лет) увеличить сроки реализации проекта.

Отметим, что в мире существует огромное разнообразие подходов к подсчету доли возобновляемых источников энергии в общей выработке электрической энергии в стране. При подсчете доли часто учитывается вся установленная мощность зеленой энергетики, т. е. не сопряженной с выбросами парниковых газов (в первую очередь углекислого) в атмосферу или же потенциально производимой путем сжигания восстанавливаемых ресурсов. По этому показателю лидируют страны [3]:

Парагвай (доля – 99,71 %);

Бутан (99,65 %);

Демократическая Республика Конго (97,69 %);

Эфиопия (98,24 %);

Норвегия (98,2 %);

Непал (98,13 %);

Албания (96,48 %);

Исландия (95,8 %);

Лаос (85,72 %);

Германия (63,28%; приведена для сравнения).

Однако удельная доля ВИЭ в балансе установленной мощности является достаточно неоднозначным показателем, так как не отражает фактической выработки электроэнергии на этих электростанциях. Реальный коэффициент использования мощности, характеризующийся отношением действительного производства электроэнергии к потенциально возможной выработке при номинальной загрузке в целом для станций, работающих на ВИЭ, составляет около 28–30 % [4]. В то же время если из общего объема ВИЭ выделить только солнечные и ветровые электростанции, то соотношение значительно меняется. На первых позициях окажутся Германия с долей в 57,31 % и Нидерланды с долей в 57,52 % (Палестина с долей в 90,57 % в сложившейся на начало 2025 г. политической ситуации не может рассматриваться как объект, подходящий для анализа). Остальные страны, включая Китай, лидирующий по суммарной мощности установленных объектов альтернативной энергетики, демонстрируют значения объема такой энергетики, не превышающие 36 %. При этом, по данным на начало 2024 г., в Германии установлено почти в 3 раза больше электростанций, относимых к ВИЭ, чем в России, но почти в 10 раз меньше, чем в Китае.

Отпуск электрической энергии, осуществляемый в данный момент на солнечных и ветровых электростанциях очень сильно зависит от погоды. Несмотря на значительные успехи в прогнозировании последней, в среднем по миру точность даже кратковременного предсказания силы ветра составляет, по разным оценкам, около 65–68 % (с разбросом в точности от 35 до 92 % в зависимости от общеклиматических условий и рельефа местности) [5]. Точность прогнозирования солнечной погоды в целом выше (доходит до 78 %), однако в силу малого коэффициента использования мощностей солнечных электростанций (около 15 %) [6] эта точность сказывается на эффективности их работы незначительно [7].

РОЛЬ НАКОПИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ В ПОДДЕРЖАНИИ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

Для альтернативной энергетики все большее значение приобретают накопители мощности. По причине того, что солнечные электростанции (на фотоэлектрических преобразователях) и ветрогенераторы производят электрическую энергию, запасание ее в других формах (тепловой, энергии сжатого воздуха и т. п.) будет снижать общий КПД системы, поэтому предпочтение отдается аккумуляторным накопителям мощности. Это

актуально даже для России: за 9 месяцев 2024 г. был установлен рекорд выработки электрической энергии на альтернативных источниках [8].

Следует отметить, что особенности климата России накладывают дополнительные ограничения на эксплуатацию аккумуляторных батарей. Из-за наличия на большей части территории РФ продолжительного периода отрицательных температур зимой и высоких летом необходимо использовать системы управления температурным режимом, учитывающие как обогрев, так и охлаждение аккумуляторных установок. В настоящее время самым большим накопителем мощности, эксплуатируемым в России, является установка, смонтированная на Бурзянской солнечной электростанции в Башкирии. Ее мощность составляет 2 МВт при возможности запасаения до 8 МВт · ч. Скорее всего, эта установка, разработанная Новосибирским государственным техническим университетом, еще долгое время будет удерживать за собой первое место, так как данный проект был реализован на элементной базе – аккумуляторах компании «Лиотех», прекратившей свою деятельность в 2019 г. после поставки аккумуляторов для указанной установки [9].

Из-за ограниченного производства аккумуляторных накопителей значительной мощности в России предпочтение отдается проектам аварийного резервирования небольшой мощности (не более 120 кВт · ч). В связи с этим ветропарки мощностью выше 100 МВт, расположенные в Мурманской области (Кольская ветроэлектростанция); Ставропольском крае (Бондаревская, Кочубеевская и Кузьминская ветроэлектростанции); Республике Адыгея (Адыгейская ветроэлектростанция); Ростовской области (Марченковская ветроэлектростанция); солнечные электростанции в Республике Калмыкия (Элистинская) и Ставропольском крае (Старомарьевская) не могут быть обеспечены сколько-либо значимым резервированием мощностей на случай изменения погодных условий, а также не в состоянии покрыть пиковые нагрузки или осуществить балансировку отпуска мощности по запросу. Отметим, что даже наиболее производительная ВИЭ-электростанция, совмещенная с системой хранения энергии мощностью 140 МВт · ч, реализуемая во Французской Гвиане, не может обеспечить прием и хранение полной отпускаемой мощности таких больших электростанций [10]. Поэтому предпочтителен проект создания децентрализованного хранилища мощности, подобного предложенному немецкой компанией Sonnen. На настоящий момент полная мощность гвианской электростанции составляет уже свыше 250 МВт · ч. Ожидается, что в ближайшие несколько лет она превысит отметку в 1 ГВт · ч [11]. Однако у варианта исполнения накопителя, состоящего из большого количества единичных накопителей малой мощности (до 25 кВт единовременно отпускаемой мощности при величине запасенной энергии до 55 кВт · ч), имеется недостаток, связанный со слабой управляемостью указанного варианта, а также сложностями с отдачей больших объемов электроэнергии в сеть. Как правило, даже в рамках концепции B2G (сокращение от англ. Battery to Grid – «от батареи в сеть»), технологически схожей с концепцией V2G (название образовано от англ. Vehicle to Grid («от автомобиля в сеть»)), предлагается решение вопроса резервирования ненадежного электроснабжения отдельных потребителей, но не рассматриваются вопросы покрытия больших объемов потребляемой электроэнергии [12, 13].

Особенно важной становится указанная задача не только с точки зрения учета перетоков мощности, но и по причине присоединения потребителей, которые могут отдавать электроэнергию, к сетям посредством линий с достаточно малым сечением. Следовательно, передача по таким сетям больших объемов электроэнергии сопряжена с большими ее потерями, а также ограничением пропускной способности отдельных участков сети. Здесь есть вероятность построения маршрутов неоптимального перетока

электрической энергии, с чем приходится мириться, так как существующие распределительные сети, в которых функционирует технология В2G (до 1000 Вольт), не имеют возможности управления потоками мощности.

Кроме того, слишком большая доля альтернативной энергетики в выработке электрической энергии приводит к высокой зависимости от погодных условий. По этой причине могут возникать ситуации, подобные произошедшей в Северной Европе в декабре 2024 г.: значительные цены на электроэнергию, вызванные отсутствием ветра на севере Германии и в Дании, привели к массовой закупке электроэнергии в Норвегии [14]. Стоимость энергии определяется на спотовом рынке (т. е. формируется на основе текущего баланса спроса и предложения), поэтому произошло стремительное, до 20-кратного, увеличение стоимости киловатт-часа. Стоит понимать, что даже мощные накопители энергии не в состоянии справиться с таким сильно возросшим спросом. При этом из-за относительно небольшого количества альтернативных источников, подключенных к магистральным сетям, привлечение их к покрытию указанного спроса затруднительно. Многие малые точки присоединения также требуют динамичного построения маршрутов передачи электрической энергии между узлами сети, в качестве которых выступают различные источники электроэнергии, потребители, а также накопители энергии, которые могут работать в режиме как потребления (заряд аккумуляторов), так и разряда (отпуск электроэнергии в сеть). В описанном случае важно, кроме проблемы управления перетоками мощности между целыми энергорайонами, решить вопрос о недопущении создания закольцованных фрагментов сети, в которых одни аккумуляторы просто заряжают соседние, а выдача мощности потребителям не производится. Данная задача является алгоритмически сложной. При этом сложность сети усиливается с ростом числа соединительных линий, а также с увеличением числа возможных состояний (включая различные уровни мощности производства и потребления электрической энергии) у элементов данной сети.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИ УПРАВЛЯЕМОЙ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ МОЩНОСТИ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

В настоящее время для решения указанных задач применяют различные стохастические алгоритмы, основанные на вероятностном прогнозировании состояний. Как правило, применяя эти алгоритмы, можно построить достаточно оптимальную конфигурацию сети. Тем не менее из-за постоянно меняющихся режимов работы элементов альтернативной энергетики (солнечных и ветровых станций) и величины вырабатываемой электроэнергии, оптимальная конфигурация может также варьироваться. Постоянное соблюдение именно такой (некой идеальной) конфигурации приводит к увеличению числа оперативных переключений в электрических сетях, управляющих потоками мощности. Это, в свою очередь, значительно снижает эксплуатационный ресурс оборудования, а также может создать опасные режимы работы электросети, в том числе резонансные явления; переходные процессы; отключения, связанные с перегрузкой отдельных фрагментов данной сети. Поэтому вопросы конструирования или доработки существующих алгоритмов с учетом поставленной сложной задачи оптимизации очень остры, актуальны. Подавляющее большинство известных алгоритмов оптимизации [15, 16] имеет существенный недостаток: в результате поиска решения находится локальный оптимум функции распределения потоков, а не глобальный. И если для неразвитых сетей с малым количеством перетоков высока вероятность совпадения локального и глобального оптимумов, то с увеличением числа соединений возрастают и сложность задачи, и опасность ненахождения оптимальной конфигурации. В силу вероятностной модели

прогнозного состояния электрической сети вопрос поиска оптимальной конфигурации, удовлетворяющей требованиям минимальных перетоков, а также наиболее низких потерь в диапазоне возможных значений колебаний мощности узлов сети, становится наиболее актуальным. Стоит учесть, что у данного вопроса-задачи, в отличие от многих других, сразу несколько целевых функций, следовательно, оптимальное с точки зрения величины потерь решение может приводить к неприемлемому отклонению напряжения в узлах сети, а также падению частоты электрической сети ниже допустимого значения. Кроме того, могут накладываться такие ограничения, как поддержание определенного уровня заряда батарей (как правило, оптимальным для литий-ионных батарей является уровень заряда от 20 до 90 %), минимизация оперативных переключений, поддержание некоторого резерва мощности в определенном районе электрической сети, ограничения на перетоки мощности по конкретным ветвям цепи (линиям электропередачи).

При постановке задачи нахождения оптимального состояния приходится иметь дело с варьированием значений многих переменных, лимитами на величины максимальных и минимальных значений функций, с временем задержки во время перехода отдельных элементов из одного состояния в другое (например, не рекомендуется перемежающийся цикл постоянного заряда-разряда батарей). Невозможно сразу вывести из производства ветрогенераторы и фотоэлектрические преобразователи, для которых существуют периоды релаксации, связанные со сбросом мощности на балластные сопротивления, а также резко завершить работу вспомогательных систем управления.

В качестве математической модели сети рассматривается ориентированный граф, в котором присутствуют как источники электроэнергии (имеющие ребра, направленные только от узла); накопители (узлы, соединенные с другими элементами двумя разнонаправленными ребрами); потребители (узлы, к которым направлены ребра). Каждому ребру присвоены два свойства: пропускная способность и характеристика, описывающая удельные потери электрической энергии в элементе. В данном случае оптимизация производится по критерию минимальных потерь электрической энергии в сети. Данный критерий в замкнутой электрической сети представляет собой хорошо поддающийся учету параметр, так как существующие системы диспетчеризации оперируют данными, получаемыми от систем учета в узлах сети (на подстанциях). Согласно технологически заданным параметрам линий электропередач, заложенным при проектировании и строительстве, пропускная способность является величиной неизменной, а расчетная величина потерь – функцией потока мощности и удельных потерь.

Целевая функция минимальных потерь в сети строится по итерационному принципу подбора вариантов величин потоков мощности. Для этого используются наличные данные о текущей мощности генерации и потребления каждого узла сети. Затем из общего массива ребер выбирают те, которые имеют максимальную пропускную способность и минимальные удельные потери. Для этих линий принимают максимальные потоки мощности, суммарно не превышающие величину потребления. Для остальных линий потоки распределяются в порядке уменьшения пропускной способности линий (ребер графа модели). Производится расчет суммарных потерь электроэнергии. Поскольку в сети могут присутствовать накопители мощности, работающие в режиме разряда, находят остаточный заряд аккумулятора через базовый шаг изменения схемы (как правило, принимаемый равным 1 ч). В случае если полученный после расчета остаточный заряд в любом узле будет меньше 20 % от максимального для данного узла, то этот узел изымается из расчетного состояния модели, поток мощности в ребрах, присоединенных к данному узлу, меняют на противоположный. Накопители, находящиеся в процессе зарядки, не должны

превышать 90 % заряда. Если этот критерий не выполняется, направление потока мощности изменяется (уходит в сторону от данного узла). После учета указанных ограничений производится вариативный перебор изменений потоков мощности. Для этого уменьшается величина потока в наиболее загруженной линии (на 10 %) с перераспределением мощности по остальным узлам и ребрам, при этом сохраняется значение мощности потребления по отдельным узлам и в сети в целом. Если снижение мощности невозможно (например, когда потребитель имеет единственный источник), в расчет берут следующее ребро, если возможно – суммарные потери определяют повторно. Если величина суммарных потерь уменьшилась, то полученная функция признается новой целевой. Расчет итерационно повторяется для всех ребер.

Недостатком указанной модели можно считать высокую продолжительность выполнения расчетов, если количество ребер в расчетном графе велико. Сложность решения задачи линейно возрастает с увеличением количества линий, что затрудняет быстрое реагирование на изменение топологии сети, вызываемое аварийными отключениями или оперативными переключениями.

Таким образом, динамическое управление энергосистемой с учетом наличия в ней активно-пассивных элементов предполагает решение задачи, которую в общем виде можно записать как

$$\begin{cases} \sum S_{\text{потр}} = \sum S_{\text{ген}} + \sum_{i=0}^n S_{i \text{ накоп. мощн}} - \sum_{20\% < j \leq 90\%}^k S_{j \text{ акк. бат}} - f_{\Sigma \text{ потерь}} \pm S_{\text{перетоков}}; \\ f_{\Sigma \text{ потерь}} = f(S_{\text{потоков. мощн}}; \Delta P_{\text{линий}}) \rightarrow \min; \\ I_{\text{линии}} \leq I_{\text{дд}}, \end{cases}$$

где $S_{\text{потр}}$ – мощность потребителей, подключенных к энергосистеме, $S_{\text{ген}}$ – мощность установленных генерирующих установок (с учетом возможных изменений этой мощности); $S_{\text{накоп. мощн}}$ – действительная мощность установленных накопителей мощности или располагаемая мощность заряженных накопителей; i – множество единиц накопителей мощности; n – число накопителей мощности на каждом этапе расчета; $S_{\text{акк. бат}}$ – мощность частично разряженных аккумуляторных батарей, находящихся в процессе зарядки; j – множество единиц требующих заряда аккумуляторных батарей; k – число аккумуляторов, которое необходимо зарядить на данном этапе расчета; $f_{\Sigma \text{ потерь}}$ – функция, описывающая величину суммарных потерь мощности в рассматриваемом фрагменте энергосистемы; $S_{\text{перетоков}}$ – мощность перетоков мощности в соседние фрагменты энергосистемы или смежные энергосистемы и из них; $S_{\text{потоков. мощн}}$ – потоки мощности во всех ветвях рассматриваемого фрагмента энергосистемы; $\Delta P_{\text{линий}}$ – удельные потери в линиях; $I_{\text{линии}}$ – ток в каждом участке расчетных линий; $I_{\text{дд}}$ – длительно-допустимый ток для каждого линейного элемента электрической сети (предельно допустимая пропускная способность линии в устоявшемся режиме).

При продолжительном использовании модели возможно введение ограничений, связанных с постепенным уменьшением величины запасаемой мощности в аккумуляторах. При таком применении в модель следует добавить учет числа циклов заряда-разряда. При использовании свинцово-кислотных аккумуляторов для накопления энергии возможно увеличение числа циклов за счет задействования специализированного процесса десульфатации [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Составление и решение приведенной выше системы уравнений, несмотря на относительно простую запись условий, являются сложными алгоритмическими задачами. Заметно облегчает расчет то, что, как правило, реальные электрические сети являются относительно вырожденными, т. е. количество реальных электрических соединений между узлами сети достаточно невелико. Однако с увеличением количества новых аккумулирующих элементов в сетях до 20 кВ наблюдается значительное возрастание поперечных связей, что усложняет энергосистему на данном уровне напряжения, а также повышает сложность задачи. Из-за жесткой иерархичности любой развитой энергосистемы, а также динамичности изменения нагрузок описанную математическую задачу необходимо решить еще на стадиях проектирования и реконструкции энергосистем с переходом на накопители мощности, так как неоптимальное расположение таких элементов и неправильный подбор их мощности приведут к разбалансировке энергосистемы, созданию циклических потоков мощности, увеличивающих технологические потери электрической энергии [18]. Предлагаемые решения, учитывающие также постепенную деградацию генерирующих мощностей (возобновляемых источников) и снижение емкости накопителей мощности, предлагается реализовать в программной среде Python с использованием Calliope – открытой библиотеки для анализа энергетических систем с высокими долями возобновляемой энергии и другой переменной генерации [19]. Апробацию результатов моделирования предлагается выполнить на симуляционной модели региональной энергосистемы с шагом изменения данных в 1 ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Осеи-Овусу Р. Алгоритмические модели управления электрической нагрузкой в системах электроснабжения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 40–50.
2. О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности: Постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 г. № 449. URL: <https://base.garant.ru/70388616/> (дата обращения: 25.12.2024).
3. Объекты ВИЭ-генерации в регионах России. URL: <https://rreda.ru/industry/imap/> (дата обращения: 25.12.2024).
4. Фрид С.Е., Лисицкая Н.В. Анализ возможности увеличения коэффициента использования установленной мощности сетевых фотоэлектрических станций // *Теплоэнергетика*. 2022. № 7. С. 74–84.
5. Perera S.M.H.D., Putrus G., Conlon M., Narayana M., Sunderland K. Wind Energy Harvesting and Conversion Systems: A Technical Review // *Energies*. 2022. V. 15. № 24. P. 9299. URL: https://www.researchgate.net/publication/366121858_Wind_Energy_Harvesting_and_Conversion_Systems_A_Technical_Review (дата обращения: 25.12.2024).
6. Багров А.Н. Сравнительная оценка успешности прогнозов элементов погоды на основе ряда отечественных и зарубежных моделей атмосферы различного масштаба // *Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. 2008. № 35. С. 3–20.
7. Тюньков Д.А., Сапилова А.А., Грицай А.С., Алексеенко Д.А., Хамитов Р.Н. Методы краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями и их классификация // *Электротехнические системы и комплексы*. 2020. № 3 (48). С. 4–10.

8. В РФ выработка «зеленой» электроэнергии может стать рекордной. URL: <https://tass.ru/ekonomika/22550341> (дата обращения: 25.12.2024).

9. РОСНАНО попросило возобновить банкротство новосибирского завода «Лиотех». URL: <https://ngs.ru/text/economics/2022/01/22/70392242/> (дата обращения: 25.12.2024).

10. Макарян И.А., Седов И.В. Состояние и перспективы развития мировой водородной энергетики // *Российский химический журнал*. 2021. Т. XLV. № 2. С. 3–21.

11. Виртуальная электростанция и реальные киловатты. URL: https://atomicexpert.com/virtual_power_station?ysclid=m7p5dqb8am426902618 (дата обращения: 25.12.2024).

12. Farzin H. Reliability cost/worth assessment of emergency B2G services in two modes of battery swap technology // *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2022. V. 31. P. 100787. URL: <https://www.x-mol.net/paper/article/1532043967462469632> (дата обращения: 25.12.2024).

13. Clean energy's next trillion-dollar business. URL: <https://www.economist.com/business/2024/09/01/clean-energys-next-trillion-dollar-business?ysclid=m7p5p7o35o125732584> (дата обращения: 25.12.2024).

14. Norway campaigns to cut energy links to Europe as power prices soar. URL: <https://www.ft.com/content/f0b621a1-54f2-49fc-acc1-a660e9131740> (дата обращения: 25.12.2024).

15. Корнеев К.Б., Соколова Ю.М. Стохастический метод оптимизации конфигурации электрических сетей с перетоками мощности между разными уровнями напряжения // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. № 2 (30). С. 148–151.

16. Sultan H.M., Kuznetsov O.N., Menesy A.S., Kamel S. Optimal Configuration of a Grid-Connected Hybrid PV/Wind/Hydro-Pumped Storage Power System Based on a Novel Optimization Algorithm. URL: https://www.researchgate.net/publication/340550967_Optimal_Configuration_of_a_Grid-Connected_Hybrid_PVWindHydro-Pumped_Storage_Power_System_Based_on_a_Novel_Optimization_Algorithm (дата обращения: 25.12.2024).

17. Маньков М.Б., Марголис Б.И. Моделирование и исследование режимов работы зарядно-десульфатирующего устройства для аккумуляторных батарей // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. № 10. С. 69–73.

18. Dudek G., Piotrowski P., Baczyński D. Intelligent Forecasting and Optimization in Electrical Power systems: Advances in Models and Applications // *Energies*. 2023. V. 16. № 7. P. 3024. URL: https://www.researchgate.net/publication/369572790_Intelligent_Forecasting_and_Optimization_in_Electrical_Power_Systems_Advances_in_Models_and_Applications (дата обращения: 25.12.2024).

19. Чекан М.А. Сравнительный анализ программного обеспечения для автоматизации процесса моделирования микросетей // *Современные наукоемкие технологии*. 2022. № 9. С. 33–38.

Для цитирования: Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Маньков М.Б., Осеи-Овусу Р. Модель оптимизации использования аккумуляторных накопителей мощности в системах с распределенной генерацией // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2025. № 2 (26). С. 93–103.

OPTIMIZATION MODEL FOR THE USE OF POWER STORAGE IN DISTRIBUTED GENERATION SYSTEMS

K.B. KORNEEV, Cand. Sc., Yu.M. PAVLOVA, Cand. Sc,
M.B. MANKOV, Postgraduate, R.OSEI-OVUSU, Postgraduate

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

An approach to the construction of an optimal configuration of electrical networks containing power storage and alternative energy facilities is considered. It was emphasized that increasing the share of alternative energy requires intensive use of battery-based power storage devices. It is indicated that this leads to a significant complication of calculations of the optimal state of the power system, taking into account the non-stationary nature of the output and consumption of electricity. It is proposed to apply methods of optimization modeling and system analysis with elements of predictive models of behavior of power system facilities to build a control system for an electric grid complex, which will ensure the maintenance of the required level of reliability of electricity supply to consumers, as well as to reduce suboptimal flows of electric energy.

Keywords: power supply system, forecast, control, reliability, batteries, power storage, optimization.

Поступила в редакцию/received: 08.02.2025; после рецензирования/revised: 09.02.2025;
принята/accepted: 17.02.2025

УДК 004.896

АРХИТЕКТУРА КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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

Современные возможности обнаружения противника, высокая мобильность боевых систем требуют немедленного принятия решений. Продемонстрирован один из способов решения этой проблемы – использование киберфизических систем в вооруженных силах. Показано, что основой подобных систем должны быть реагирующие беспроводные сенсорные сети (РБСС). Приведен вариант построения архитектуры РБСС для военных приложений с использованием сенсорных узлов с радиосвязью ближнего действия, а также беспроводных шлюзов, обеспечивающих беспроводную связь на большие расстояния. Разработан механизм обнаружения вторжения объекта в защищаемую зону с применением возможностей реагирующих беспроводных сенсорных сетей. Сделан вывод, что основой механизма обнаружения являются последовательности изображений (кадров), позволяющие определить значения, с помощью которых строятся модель сети, модель движения объектов, модель измерений и т. п.

Ключевые слова: распределенный процесс, отслеживание целей, обнаружение, локализация, классификация, сенсорный узел.

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-2-103-113

ВВЕДЕНИЕ

Киберфизические системы в вооруженных силах – новая концепция передачи данных между физическими объектами различных родов войск («вещами»), оснащенными встроенными средствами сбора, обработки данных и информационными технологиями для взаимодействия друг с другом с целью информирования командиров всех уровней о ситуационной обстановке и принятия эффективных решений [1–4]. Подобные системы позволяют при выполнении боевых задач соединить физические процессы, требующие практической реализации управления в режиме реального времени, с программно-электронными системами и информационными технологиями. Из практики локальных войн в Сирии, Ираке, а также при проведении специальной военной операции на Украине стало ясно, что необходим переход от встраивания в систему управления войсками отдельных компонент (решающих частные задачи), к технологиям представления всего процесса ведения боевых операций в настоящем времени. В этом процессе ключевыми становятся проблемы временной синхронизации большого числа видов и средств, участвующих в боевом столкновении, для достижения поставленных целей, решения выдвинутых задач и получения результата оптимальным способом.

Тактические киберфизические системы – основа, обеспечивающая превосходство над противником, так как наличие этих систем гарантирует ситуационную осведомленность обо всем стратегическом спектре боевых операций и принятие решений в условиях жестких временных ограничений; все это достигается путем обработки максимально возможной совокупности мультимедийных и мультиспектральных данных в реальном времени. Эта способность позволяет реализовать адаптированное планирование боевых задач; вести целеуказание, оценку боевых потерь, мониторинг надежности распределенных мобильных средств связи и тому подобного на уровне зоны ведения боевой операции. При этом мобильное боевое информационное оборудование, тактические сетевые средства связи и специальные оперативные средства управления интегрируются с регулируемыми, устойчивыми, прозрачными для пользователя глобальными сетями, что соответствует философии «солдат как система». Основой киберфизических систем являются реагирующие беспроводные сенсорные сети (РБСС), рассматриваемые в качестве базы для сбора и обработки исходной информации, лежащей в основу военных предложений.

АРХИТЕКТУРА РБСС КАК ЭЛЕМЕНТ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Беспроводные сенсорные сети – новое поколение сетей – рассматривается как одна из технологических основ окружающего интеллекта, способного собрать огромное количество информации из внешней среды. В настоящее время сенсорные узлы оснащены достаточно мощным бортовым процессором, что позволяет использовать их мощности для выполнения простых вычислений, частичной обработки и передачи данных, принятия решений локально, в зоне своей ответственности.

Вариант архитектуры РБСС для военных приложений может быть построен путем применения сенсорных узлов с радиосвязью ближнего действия, а также беспроводных шлюзов, обеспечивающих беспроводную связь на значительные расстояния. Это гарантирует большую гибкость и расширяемость в возможных видах

операций (как небольшого одиночного кластера сенсорных узлов, так и множества соединений на площади до 20 км²).

Сенсорные узлы находятся на первом уровне иерархии, на котором выполняют основные операции мониторинга и воздействия на среду. Они оснащены встроенными преобразователями, такими как акустические, сейсмические, пассивные инфракрасные (PIR), магнитные, пьезоэлектрические и другие, для обнаружения событий, представляющих интерес. При этом они способны подтвердить обнаружение благодаря перекрестному поиску и произвести классификацию. Каждый узел датчика в сети действует как маршрутизатор, пересылая пакеты данных на соседние узлы. Они формируют сеть на лету и поддерживают единый радиоинтерфейс для 2-направленной связи между узлами с датчиками и узлом слияния.

На втором уровне иерархии узлы слияния обеспечивают более сложные функции, такие как синхронизация базы данных, формирование кластера, формирование логики работы приложения и управление. Узлы слияния получают информационные запросы от пользователей, отслеживают команды, отвечают на запросы, формируют задачи для узлов датчиков, собирают информацию и сохраняют историю событий, произошедших в зоне ответственности, охватываемой узлом слияния. Узлы слияния могут выступать в качестве исполнительных механизмов в сети (например, для запуска встроенной или близлежащей камеры с целью получения изображений, близких к реальному времени и пр.). Узлы слияния на втором уровне иерархии, в отличие от типичной РБСС, образуют специальную сеть, обеспечивающую охват территории при расширенном варианте развертывания сети. Они могут быть оснащены несколькими радиоинтерфейсами для связи с сенсорными узлами и другими узлами слияния, а также для передачи данных на большие расстояния в узел управления. Сенсорные узлы и узлы слияния образуют кластеры, которые соединяются между собой через головные узлы слияния для создания автоматической наземной сенсорной системы.

Узел управления (MN) на третьем уровне обеспечивает оперативный контроль и управление системой. Для связи с указанным узлом узел слияния на этом уровне использует канал дальней связи. Авторизированные пользователи, согласно правам доступа, получают доступ к системе с узлов слияния данных второго уровня или с узла управления третьего уровня. С портативного устройства (ноутбука) или стационарного персонального компьютера пользователь, имеющий надлежащую авторизацию, может запрашивать события и подписываться на них, получать оповещения и просматривать историю действий системы.

Сенсорный узел. Сенсорный узел (*мод*) используется как для мониторинга среды, так и для воздействия на среду самостоятельно или в составе группы средств. Его архитектура характеризуется пятью основными компонентами:

- 1) сенсорной подсистемой, включающей в себя датчики и радар, для контроля состояния внешней среды, с соответствующими аналого-цифровыми преобразователями;
- 2) подсистемой обработки, содержащей микроконтроллеры и память для хранения данных;
- 3) радиопередатчиком для беспроводной передачи данных;
- 4) устройством электропитания;
- 5) подсистемой исполнения решений.

В зависимости от конкретного применения сенсорные узлы могут обладать дополнительными компонентами, такими как система позиционирования, мобилизатор средств изменения местонахождения и т. п. Сенсорные узлы образуют сенсорное поле. Как правило, они находятся в спящем состоянии. Когда происходит событие (неожиданно или по расписанию, в определенное время) эти узлы «просыпаются»,

самоорганизовываются в сеть и передают информацию в центр сбора данных. Сенсорная сеть поддерживает основные интерфейсы и протоколы, которые применяются в настоящее время в глобальных и локальных сетях. Это позволяет интегрировать ее в существующую сеть.

Область применения РБСС – это, как правило, неопределенные и плохо организуемые среды, поэтому достичь желаемой эффективности подобных комплексов возможно главным образом путем совершенствования интеллектуальной составляющей их системы управления в целом и отдельных узлов в частности. Ситуация усложняется из-за наличия требований скрытости, миниатюризации, экономичного энергопотребления. На практике требуется в качестве мота сети использовать автономный узел, который должен обладать свойством интеллектуального поведения: быть способным к изучению обстановки и принятию решений как самостоятельно (с учетом получаемых от других устройств сети данных), так и в составе группы.

Система управления узлом, использующая паттерны. Жесткие требования в ряде предметных областей к времени реагирования, объему памяти, быстродействию микрочипа и уровню энергопотребления предполагают использование сравнительно простых алгоритмов, построенных путем описания лучшего опыта человека при выполнении функциональных задач. В работах [1–3] показано, что такое описание можно реализовать, если выяснить классы типовых ситуаций и успешные способы действия в реальных условиях для формирования моделей поведения (паттернов). Обобщенная логическая схема описания алгоритма дана в работе [5]:

Имя паттерна:

$$\begin{aligned} &\text{так как [мотивы } M] \\ &\text{поскольку [цели } G] \\ &\text{если [предусловие } U^*] \\ &\text{то способ действия [} r_Q(t) \text{]} \\ &\text{из-за чего [поступление } U^{**}] \\ &\dots \\ &\text{есть альтернатива [} r_P(t) \text{]} \end{aligned} \quad (1)$$

В модели (1) все составляющие, кроме логических связей, могут представлять собой языковые конструкции на естественном языке или естественно-профессиональном языке. Следовательно, модель (1) – типовая естественно-языковая модель паттерна. Формальная модель паттерна поведения в типовой ситуации приведена в [6]. Там же показано, что модель предметной области и модель принятия решений в условиях дефицита времени можно формализовать с помощью нечетких продукционных сетей. Мотивы в модели (1) – это причины, определяемые потребностями и (или) обязательствами. Они побуждают агента к активности, в рамках которой потребовался паттерн. Описание мотивов и целей в модели (1) представляет контекст повторного применения паттерна с позиции необходимости и возможности его использования (потребности \rightarrow мотивы \rightarrow цели). Контекст определяется ожидаемыми постусловиями. Постусловия связаны с целями, затребовавшими паттерн, но отражают их в форме возможного состояния, к которому приведет применение паттерна. Цели задают желаемое состояние и являются причинами оценивания необходимости и полезности стремления к их достижению. Способ действия представляет собой код как естественно-языковое описание схемы действия, приводящей к выполнению паттерна. Такое описание имеет вид методик, реализованных на языке программирования.

Набор моделей или паттернов поведения образует опыт или базу знаний его носителя. Модель индивидуального поведения автономного узла предполагает

формирование базы паттернов на основе экспериментального опыта, что и позволяет реализовать эволюцию паттерна «кооперативного интеллекта», благодаря использованию искусственного когнитивного процесса, аналогичного тому, что имеет место быть у естественных существ. Отметим, что в системе, появившейся на основе знаний, эта возможность отсутствует.

Для реализации описанного подхода используют программно-технический комплекс, позволяющий производить моделирование среды (контекста) и паттерна поведения эксперта (агента) [7].

Архитектура интеллектуальной системы управления РБСС имеет иерархическую структуру. Верхний уровень, реализуемый оператором, соответствует таким свойствам, как выживание, безопасность, выполнение обязательств согласно миссии, накопление и корректировка *базы знаний* в виде эффективных паттернов поведения. Объектом управления является РБСС, рассматриваемая как некоторая функциональная система. Она осуществляет:

- 1) расчет текущих показателей удельной ценности по результатам и эффективности в момент t [5];
- 2) расчет и реализацию способа действия (поведения) в момент t согласно заданному паттерну поведения;
- 3) мониторинг результатов реализации паттерна поведения.

Оператор отрабатывает указанные паттерны при выполнении миссии и выполняет анализ ее выполнения. Узел рассчитывает последовательности состояний $y(t)$, реализует задачи миссии и выполняет расчет оценки удельной ценности и эффективности [5, 6] отработки фактических ситуаций. Такой подход к моделированию поведения узлов в сети на основе паттернов аналогичен подходу в прагматической эпистемологии, согласно которому знания рассматриваются как множество теорий или моделей, каждая из которых представляет собой описание поведения при решении определенного класса задач. Теории, описывающие класс явлений, могут «перекрываться», и возникает проблема выбора способа решения задач в конкретной предметной области. Критерием выбора становится ожидаемая удельная ценность возможного результата [6]. Процесс получения знания в предлагаемой схеме похож на процесс биологической эволюции. Следовательно, критерием истинности знания искусственной сущности является *«приспособленность»* этого знания для решения задач предметной области.

Система локализации, классификации, отслеживания и поражения объектов вторжения в защищаемую зону. Локализация, классификация и отслеживание объектов вторжения в защищаемую зону особо важных объектов составляют основу системы защиты.

В системах защиты от вторжения реагирующие РБСС являются интерфейсом между физическим миром и информационными технологиями [8, 9]. Важнейшей характеристикой этих приложений выступает продолжительность жизненного цикла, определяемая возможностями энергетической системы сенсорной сети [1]. Поток вторжений быстро движущихся целей в сенсорную сеть оказывает наиболее сильное воздействие на длительность ее жизненного цикла [1]. Это ставит перед разработчиком ряд задач. Возможные подходы и варианты их решения рассматривались в [3, 7]. Изложенные в указанных источниках алгоритмы обнаружения и отслеживания основаны на обработке сигналов на базовой станции, в то время как локализация и отслеживание множества целей требуют совместной работы группы узлов. Повышение живучести системы защиты связано с наделением ее набором следующих функций:

1. Распределение и обработка (CSP).
2. Обработка данных по событию [2].
3. Агрегирование информации.

4. Динамическая кластеризация.

Входные данные для обнаружения и локализации объектов РБСС. Объект проникновения в процессе движения генерирует сигналы. Величина уровня мощности воспринимаемого сенсорами сигнала (англ. *RSSI, om Received Signal Strength Indicator*) зависит от расстояния *узел – цель*. Спектр сигналов будет иметь максимум при прохождении цели над узлом или в непосредственной близости, и он может рассматриваться как индивидуальная характеристика цели или сигнатура, которую можно использовать при определении типа цели.

Событие «**обнаружение цели**» будет возникать тогда, когда выход сенсора узла превышает некоторый порог, величина которого регулируется так, чтобы частота ложной тревоги не превышала некоторую настраиваемую норму. Значение сигнала при перемещении объекта воспринимается «широковещательно», т. е. все узлы, в радиусе восприятия которых находится цель, ее «слышат». Узлы, «слышащие» цель, осуществляют считывание значений спектра сигнала цели в определенные моменты времени ее движения. Тем самым формируются пространственная и временная характеристики поля фактической сигнатуры цели. Характер изменения цели пространственно-временной сигнатуры задает частоту временной дискретизации в пространстве-времени и количество активируемых узлов. В работах [3] для обеспечения отслеживания цели и эффективной локальной обработки данных в сенсорной сети предложено разделить область проникновения на пространственно-временные ячейки (окна). Их размер зависит от скорости, направления движения и показателя затухания прохождения сигнала в среде. Размер ячейки должен приблизительно соответствовать области, внутри которой в течение некоторого времени спектр считываемой сигнатуры остается практически постоянным, а его падение на границах не превышает некоторого порогового значения. Это предполагает введение пространственно-временных координат в анализ и динамическую коррекцию размера пространственно-временных ячеек на основе прогнозируемых местоположений, типов целей и показателей их движения.

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ

Модель сети РБСС. Беспроводная сенсорная цель состоит из S узлов акустических датчиков, и все узлы равномерно распределены в зоне мониторинга. Положение каждого сенсорного узла известно, и он может фиксировать интенсивность воспринимаемого звука [5]. Между сенсорными узлами реализована беспроводная сеть, и каждый узел «знает» местоположение своих соседних узлов (расстояние меньше расстояния связи).

Модель движения объектов проникновения в РБСС. Предположим, что K целей перемещаются в зоне мониторинга, причем *известно, что K является фиксированным*. Перемещение полей относительно независимо, а состояние k -й цели в момент времени t описывается так:

$$\begin{aligned} X_{k,t} &= [x_{k,t}, y_{k,t}, \dot{x}_{k,t}, \dot{y}_{k,t}], \quad k = \overline{1, K}; \\ X_{k,t} &= f(X_{k,t-1}, w_{k,t-1}), \end{aligned}$$

где $f(\bullet)$ – функция передачи состояния, которая может быть линейной или нелинейной функцией [10]; $w_{k,t-1}$ – шум состояния k -й цели.

Причем для $w_{k,t-1}$ известна функция распределение вероятностей.

Модель измерения. Предположим следующее: все датчики являются акустическими; наблюдение датчика представляет собой наложение звуковых сигналов

от нескольких целей на окружающий шум [4]; наблюдения отдельных датчиков независимы друг от друга. Тогда в момент времени t энергия звукового сигнала, принимаемого датчиком узла s в положении $r_s = [x_s, y_s]$:

$$y_{s,t} = g_s(X_t) + v_{s,t} = \sum_{k=1}^K \frac{\psi_k}{\|r_s - l_{k,t}\|} + v_{s,t}, \quad (2)$$

где $g(\bullet)$ – функция звуковой энергии от цели, измеренная s -м узлом [10]; $X_t = [X_{1,t}^T, X_{2,t}^T, \dots, X_{K,t}^T]$ – совместное состояние K целей; ψ_k – энергия звука от k -й мишени, измеренная на единичном расстоянии; $l_{k,t}$ – положение объекта k в момент времени t ; $v_{s,t}$ – интенсивность шума, получаемая датчиком в момент времени t (она не зависит от $w_{k,t}$, $k = 1, 2, \dots, K$). Выражение

$$\|r_s - l_{k,t}\| = \sqrt{(x_s - x_{k,t})^2 + (y_s - y_{k,t})^2} -$$

это евклидово расстояние между r_s и $l_{k,t}$ (норма, $k = \overline{1, K}$).

Уравнение (2) – коэффициент потерь, который определяется средой распространения сигнала и может считаться постоянным и равным для всех датчиков. Когда длина временного окна T для усреднения энергии достаточно велика, можно считать, что значения $v_{s,t}$ подчиняются нормальному распределению со средним значением μ_v , и дисперсией σ_v^2 .

Распределенный алгоритм отслеживания нескольких целей. В РБСС плотность узлов, как правило, высока. Если все узлы всегда активны, то ресурсы узлов тратятся впустую, что легко приводит к конфликтам связи. Целесообразно, чтобы узел, как правило, находился в «спящем» состоянии и только при получении сообщения об активации от другого узла «просыпался» и начинал участвовать в наблюдении. Из наблюдения датчика следует, что когда датчик расстояния до цели находится далеко, сигнал, принимаемый датчиком от цели, невелик (это приводит к небольшому соотношению сигнал/шум и информация о наблюдениях практически не влияет на обновление оценки состояния цели). Поэтому при отслеживании следует в каждый момент времени выбирать только необходимые узлы для участия в наблюдении вокруг цели в соответствии с воспринимаемой информацией о состоянии каждой цели. **Когда в зоне мониторинга РБСС находится несколько целей и эти цели расположены так далеко друг от друга, что сигналы от других целей, принимаемые датчиками вблизи одной из них, являются слабыми и могут быть проигнорированы, то ВЫПОЛНЯЕТСЯ ОТСЛЕЖИВАНИЕ ТОЛЬКО ОДНОЙ ЦЕЛИ.** Только когда цели находятся близко друг к другу настолько, что сигналы, принимаемые датчиками вблизи цели, являются более сильными (выше заданного порога), тогда измерение СЧИТАЕТСЯ ОТ НЕСКОЛЬКИХ ЦЕЛЕЙ, что требует многоцелевого измерения и совместного сглаживания. На результатах проведенного выше анализа базируется идея предполагаемого распределенного алгоритма отслеживания нескольких целей, которая звучит так: **ДЛЯ КАЖДОЙ ЦЕЛИ ОДНОВРЕМЕННО ВЫБИРАЕТСЯ ОДИН ГЛАВНЫЙ УЗЕЛ (главная идея алгоритма).** Главный узел, соответствующий цели, запускает алгоритм фильтра частиц.

Главный узел выбирают соответствующие подчиненные узлы для участия в наблюдении в соответствии с заданными правилами и оценивают расстояние между целями также согласно определенным правилам. Если цель находится далеко от других целей, то выполняется отслеживание только одной цели. Если цель находится вблизи нескольких узлов, то все главные узлы обмениваются информацией о прогнозировании состояния цели и используют информацию о полученных нескольких состояниях цели для вычисления веса частиц текущей цели, чтобы реализовать распределенное отслеживание нескольких целей. Главные узлы, соответствующие конкретным целям, обмениваются данными о состоянии посредством беспроводной связи.

Выбор ведущего и ведомого узлов. На начальном этапе следует указать узел, ближайший к каждой цели, в качестве ее главного узла и в соответствии с априорной информацией о каждой цели. В процессе отслеживания текущий главный узел выбирает узел, ближайший к прогнозируемому положению цели, в качестве главного узла на следующий момент согласно прогнозируемому положению цели, т. е. в каждый момент главный узел каждой цели выбирает определенный подчиненный узел для участия в наблюдении в следующий момент времени. При выборе подчиненных узлов могут использоваться различные правила.

Правила многоцелевого совместного отслеживания. Совместное отслеживание нескольких целей требуется только в том случае, если расстояния между ними относительно малы и сигналы влияют друг на друга. Поскольку это распределенное отслеживание, информация о каждой цели хранится на разных главных узлах и указанным ранее набором невозможно напрямую оценить расстояние до целей. Согласно описанному выше алгоритму выбора главного и ведомого узлов, все подчиненные узлы находятся вблизи главного узла. Таким образом, можно использовать главный узел для создания общего подчиненного узла, определяющего расстояния между объектами. Инфологический смысл: главный узел выбирает подчиненный в соответствии с определенными правилами.

Пусть подчиненный узел получает сообщение от более чем двух главных узлов одновременно, т. е. от главных узлов S_1, S_2, \dots, S_N . Тогда подчиненный узел отправляет информацию об узлах $j, j = 1, 2, \dots, N$ и $j \neq i$ своему главному узлу S_i , чтобы узел S_i знал, что цель им должна отслеживаться совместно с другими $N - 1$ главными узлами. Если главный узел S_i не получает информацию, относящуюся к цели другого главного узла, то цель, соответствующая главному узлу, выполняет отслеживание единственной цели.

Распределенный процесс отслеживания. Распределенное многоцелевое отслеживание состоит в поиске соответствия между каждой целью в предыдущем и последующем кадрах последовательно. В случае интеллектуального мониторинга городского дорожного движения отслеживаемая скорость движущейся цели обычно составляет менее 36 км/ч. Она контролируется камерой с частотой 30 кадров в секунду, расстояние между соседними кадрами составляет менее 1 м. Можно сформулировать характеристики в последовательности собранных смежных изображений:

один и тот же объект съемки должен иметь наименьшую среднюю разницу в оттенках серого между двумя соседними кадрами;

между соседними кадрами одного и того же объекта должны быть перекрывающиеся области, такие, что абсолютное значение разницы этих площадей было бы минимальным.

С помощью этих характеристик определяют три собственных значения (центроидное расстояние L , средний уровень серого H и разность площадей A) по формулам [3–5]:

$$L_{ij} = \frac{\sqrt{(x_t^i - x_{t-1}^i)^2 + (y - y_{t-1}^i)^2}}{\max_{x^n} \left\{ \sqrt{(x_t^i - x_{t+1}^n)^2 + (y - y_{t+1}^n)^2} \right\}}, \quad n = \overline{1, K}, \quad (3)$$

$$H_{ij} = \frac{|G_t^i - G_{t+1}^i|}{\max_{x^n} |G_t^i - G_{t+1}^n|}, \quad (4)$$

$$A_{ij} = \frac{|S_t^i - S_{t+1}^i|}{\max_{x^n} |S_t^i - S_{t+1}^n|}. \quad (5)$$

где t – номер последовательности; i, j – номера кадров.

Формулы (3)–(5) представляют взаимосвязь между оценками цели в текущем кадре и соответствующими значениями оценки объекта в следующем, где (x, y) – координата центра тяжести объекта, G – шкала серого объекта, A – площадь объекта и определенный вектор признаков равен $V = (L, H, A)^T$. Функция измерения расстояния между объектами

$$D^{mn} = V^{mn}W,$$

где W – диагональная матрица 3×3 , представляющая вес (w_l, w_h, w_a) элемента вектора признаков; m и n – порядковые номера объектов в соседних кадрах.

Вес объектов не фиксирован.

Если рассматривать многоцелевое сопоставление как глобальную задачу оптимизации, то цель состоит в том, чтобы определить общее оптимальное соответствие для каждой цели в соседнем кадре путем нахождения минимального значения D_T :

$$D_T = \sum_{m=1}^K D^{mn},$$

где K – количество целей в следующем кадре.

При введении множителя Лагранжа

$$D_T = \sum_{m=1}^K D^{mn} + \lambda(w_l w_h w_a - 1). \quad (6)$$

Чтобы определить минимальное значение D_T , найдем производную D_T (см. формулу (6)) по каждому параметру и приравняем к нулю:

$$\begin{cases} \frac{\partial D_T}{\partial w_l} = 0; & \frac{\partial D_T}{\partial w_h} = 0; & \frac{\partial D_T}{\partial w_a} = 0; \\ & w_l w_h w_a - 1 = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Решением уравнения (7) является

$$\begin{cases} w_l = \sqrt[3]{\sum_{m=1}^k H^{mn} \sum_m^k A^{mn}} / \sqrt[3]{\left(\sum_{m=1}^k L^{mn}\right)^2} \\ w_h = \sqrt[3]{\sum_{m=1}^k L^{mn} \sum_m^k A^{mn}} / \sqrt[3]{\left(\sum_{m=1}^k H^{mn}\right)^2} \\ w_a = \sqrt[3]{\sum_{m=1}^k H^{mn} \sum_m^k L^{mn}} / \sqrt[3]{\left(\sum_{m=1}^k A^{mn}\right)^2} \end{cases} \quad (8)$$

Для того чтобы найти наилучшее приближение, следует сначала вычислить соответствующее значение веса согласно (8). Затем определить минимальное значение D^{mn} ; соответствующая ему область R^m будет наилучшим соответствием R^n . Если значение D^{mn} больше порогового значения α , это означает, что цель не была найдена в следующем кадре и центр тяжести находится на краю изображения. Данная ситуация соответствует исчезновению цели из последующего изображения. Если цель совпадает, то все еще остаются избыточные цели в выбранной цели и центр тяжести находится на краю изображения. Эта ситуация соответствует появлению новой цели. Если новая цель просто попадает на изображение, то она будет находиться в процессе сопоставления в следующем цикле. Новая цель добавляется в список целей и, если цель покидает экран, цель удаляется из списка целей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения возможностей применения РБСС в военных приложениях исследования и разработки данных сетей должны быть направлены на создание: отечественных 1-кристаллических процессоров; на разработку алгоритмов идентификации нескольких одновременных событий, классификации объектов и событий в задачах обнаружения; на миниатюризацию и интеграцию различных типов датчиков, повышение их надежности; на совершенствование форматов и стандартов на выходах датчиков и коммуникаций. Актуальными проблемами являются разработка алгоритмов Sensor Data Mining на основе методов искусственного интеллекта и интеллектуального анализа данных, синтеза и генерации знаний на базе бортовой осведомленности и онтологий. Увеличение жизненного цикла сети возможно при разработке новых источников питания и энергетически эффективных протоколов коммуникации между узлами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shit R.C., Sharma S., Puthal D., Zomaya A.Y. Location of Things (LoT): A Review and Taxonomy of Sensors Localization in IoT Infrastructure. URL: https://www.researchgate.net/publication/322729301_Location_of_Things_LoT_A_Review_and_Taxonomy_of_Sensor_Localization_in_IoT_Infrastructure (дата обращения: 21.02.2025).
2. Виноградов Г.П., Емцев А.С., Федотов И.С. Беспроводные сенсорные сети в защищаемых зонах // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2021. № 1 (218). С. 19–30.
3. Brooks R.R., Griffin C. Traffic model evaluation of ad hoc target tracking algorithms // *The International Journal of High Performance Computing Applications*. 2002. V. 16. № 3. P. 221–234. URL: <https://pure.psu.edu/en/publications/traffic-model-evaluation-of-ad-hoc-target-tracking-algorithms> (дата обращения: 21.02.2025).
4. Lee E.A., Seshia S.A. Introduction to embedded systems: A cyber-physical systems approach. MIT press, 2017. 589 p. URL: <https://ptolemy.berkeley.edu/books/leeseshia/> (дата обращения: 21.02.2025).

5. Xu Y., Winter J., Lee W.C. Prediction-based strategies for energy saving in object tracking sensor networks. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1263084> (дата обращения: 22.02.2025).

6. Toor A.S., Jain A.K. A survey on wireless network simulators // *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*. 2017. V. 6. № 1. P. 62–69.

7. Chen J.C., Hudson R.E., Yao K. Maximum-likelihood source localization and unknown sensor location estimation for wideband signals in the near-field. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1018778> (дата обращения: 22.02.2025).

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

9. Виноградов Г.П., Конюхов И.А., Шепелев Г.А. Подход к проектированию программного обеспечения систем управления искусственными сущностями // *Программные продукты и системы*. 2021. Т. 34. № 1. С. 5–18.

10. Rodriguez-Zurrutero R., Utrilla R., Rozas A., Araujo A. Process management in IoT operating systems: Cross-influence between processing and communication tasks in end-devices // *Sensors*. 2019. V. 19. № 4. P. 805.

Для цитирования: Виноградов Г.П., Кирсанова Н.В. Архитектура киберфизических систем // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 2 (26). С. 103–113.

ARCHITECTURE OF CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

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

Modern enemy detection capabilities and high mobility of combat systems require immediate decision-making. One of the ways to solve this problem is demonstrated – the use of cyber-physical systems in the armed forces. It is shown that the basis of such systems should be responsive wireless sensor networks (BSN). A variant of the RBS architecture for military applications using sensor nodes with short-range radio communications and gateways and providing wireless communication over long distances is presented. A mechanism for detecting the intrusion of an object into a protected area using the capabilities of responsive wireless sensor networks has been developed. It is concluded that the detection mechanism is based on sequences of images (frames) that allow determining the values used to build a network model, a model of object movement, a measurement model, etc.

Keywords: distributed target, tracking process, detection, localization, classification, sensor node.

Поступила в редакцию/received: 26.02.2025; после рецензирования/revised: 03.03.2025;
принята/accepted: 10.03.2025

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Технические науки»

**Научный рецензируемый журнал
№ 2 (26), 2025**

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

Редактор Ю.А. Якушева
Корректор С.В. Зорикова

Подписано в печать 06.05.2025

Дата выхода в свет 22.02.2025

Формат 60 x 84/8

Усл. печ. л. 13,25

Бумага писчая

Физ. печ. л. 14,25

Цена свободная

Уч.-изд. л. 12,39

Тираж 500 экз.

Заказ № 20151

С – 114

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22
Отпечатано в ООО «Издательство «Триада»
170034, Тверь, пр. Чайковского, д. 9, офис 514