

ВЕСТНИК

науки и образования
Северо-Запада России

2025, Т.11, №2

ISSN 2413-9858

Научный рецензируемый электронный журнал



КАЛИНИНГРАДСКОЕ
ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ
ИНЖЕНЕРНОЙ
АКАДЕМИИ



www.vestnik-nauki.ru

JOURNAL

**of Science and Education
of North-West Russia** 2025, V.11, №2

ISSN 2413-9858



**KALININGRAD
REGIONAL BRANCH
OF RUSSIAN
ENGINEERING
ACADEMY**



www.vestnik-nauki.ru

Вестник науки и образования Северо-Запада России: научное рецензируемое электронное издание, 2025, Т. 11, № 2 (номер опубликован 29.06.2025)

Редакционный совет

Председатель:

Гусев Борис Владимирович, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, Президент Российской и Международной инженерных академий (Москва, Россия).

Члены редакционного совета:

Наумов Владимир Аркадьевич, д-р техн. наук, профессор, главный редактор журнала «Вестник науки и образования Северо-Запада России» (Калининград, Россия).

Пугачев Игорь Николаевич, д-р техн. наук, доцент (Хабаровск, Россия).

Guoliang Zhang, Doctor of Technical Sciences, Professor (Wuhan, China).

Пилипенко Владимир Митрофанович, д-р техн. наук, профессор, иностранный член Российской академии архитектуры и строительных наук (Минск, Беларусь).

Учредитель журнала – Калининградское региональное отделение общероссийской общественной организации «Российская инженерная академия»

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 06.10.2015. Реестровая запись ЭЛ № ФС 77-63282.

Адрес редакции: 238300, Калининградская область, г. Гурьевск, ул. Заречная, д. 3а

Journal of Science and Education of North-West Russia: Scientific Peer-reviewed Electronic Journal, 2025, V. 11, No. 2. (number published 29.06.2025)

Editorial Council

Chairman:

Boris V. Gusev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Member-correspondent Russian Academy of Sciences, President of Russian and International Engineering Academies (Moscow, Russia).

Co-chair:

Vladimir A. Naumov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Editor in chief «Journal of Science and Education of North-West Russia» (Kaliningrad, Russia).

Igor N. Pugachev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Khabarovsk, Russia).

Guoliang Zhang, Doctor of Technical Sciences, Professor (Wuhan, China).

Vladimir M. Pilipenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Foreign member Russian Academy of Architecture and Building Sciences (Minsk, Belarus).

The Journal founder – Kaliningrad regional branch of all-Russian public organization «Russian engineering Academy».

Registered by the Federal Service for supervision in the sphere of Telecom, information technologies and mass communications 06.10.2015. Registry entry ЭЛ № ФС 77-63282.

Address: 238000, Kaliningrad region, city of Gurievsk, Zarechnaya st., 3A

Редакционная коллегия

Главный редактор:

Наумов Владимир Аркадьевич, д-р техн. наук, профессор (Калининград, Россия).

Ответственный секретарь:

Агеев Олег Вячеславович, д-р техн. наук, доцент (Калининград, Россия).

Члены редакционной коллегии:

Великанов Николай Леонидович, д-р техн. наук, профессор (Калининград, Россия).

Корягин Сергей Иванович, д-р техн. наук, профессор (Калининград, Россия).

Ложкин Виталий Петрович, д-р наук (Калининград, Россия).

Мезенова Ольга Яковлевна, д-р техн. наук, профессор (Калининград, Россия).

Овсянников Виталий Юрьевич, д-р техн. наук, доцент (Воронеж, Россия).

Рудинский Игорь Давидович, д-р пед. наук, профессор (Калининград, Россия).

Сербиновский Борис Юрьевич, д-р экон. наук, профессор (Ростов-на-Дону, Россия).

Тележкин Владимир Фёдорович, д-р техн. наук, профессор (Челябинск, Россия).

Фёдоров Сергей Васильевич, д-р техн. наук, профессор (Калининград, Россия).

Шарков Олег Васильевич, д-р техн. наук, доцент (Калининград, Россия).

Editorial Board

Editor in chief:

Vladimir A. Naumov, Doctor of Technical Sciences, Professor (Kaliningrad, Russia).

Executive Secretary:

Oleg V. Ageev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Kaliningrad, Russia).

The members of the Editorial Board:

Nikolay L. Velikanov, Doctor of Technical Sciences, Professor (Kaliningrad, Russia).

Sergey I. Koryagin, Doctor of Technical Sciences, Professor (Kaliningrad, Russia).

Vitaly P. Lozhkin, Doctor of Sciences (Kaliningrad, Russia).

Olga J. Mezenova, Doctor of Technical Sciences, Professor (Kaliningrad, Russia).

Vitaly J. Ovsyannikov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Voronezh, Russia).

Igor D. Rudinskiy, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor (Kaliningrad, Russia).

Boris Yu. Serbinovskiy, Doctor of Economic Sciences, Professor (Rostov-on-Don, Russia).

Vladimir F. Telezhkin, Doctor of Technical Sciences, Professor (Chelyabinsk, Russia).

Sergey V. Fedorov, Doctor of Technical Sciences, Professor (Kaliningrad, Russia).

Oleg V. Sharkov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor (Kaliningrad, Russia).

СОДЕРЖАНИЕ CONTENT

Пищевые системы Food systems

- Альшевский Д.Л., Мошарова М.Э., Альшевская М.Н.** Исследование качественных характеристик формованных изделий из фарша кальмара с добавлением структурированных наполнителей. 6–16
Alshevsky D.L., Mosharova M.E., Alshevskaya M.N. Study of quality characteristics of molded products from minced squid with the addition of structured fillers.
- Агеев О.В.** Анализ эффективности роторных инструментов в виде логарифмической и архимедовой спиралей при резании пищевых материалов. 17–30
Ageev O.V. Analysis of rotary tools efficiency in the form of logarithmic and archimedean spirals during food materials cutting.

Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология Hydraulic engineering, hydraulics and engineering hydrology

- Наумов В.А.** Дискретный метод определения оптимального диаметра водопровода. 31–41
Naumov V.A. The discrete method for determining the water pipe optimal diameter.
- Федоров В.М., Васильева Е.В.** Бетоны с мелким местным песком для гидромелиоративного строительства. 42–53
Fedorov V.M., Vasilyeva E.V. Concretes with fine local sand for irrigation and drainage construction.

Педагогические науки Pedagogical sciences

- Савченко А.В., Вараксина А.С., Рудинский И.Д.** Образовательное приложение с игровыми элементами для подготовки к ОГЭ по информатике. 54–66
Savchenko A.V., Varaksina A.S., Rudinskiy I.D. An educational application with game elements for preparing for the MSE in computer science.

Научный обзор Scientific review

- Саинов М.П., Талалаев Н.С.** Противофильтрационные стены ограждающих дамб хранилищ жидких отходов: краткий обзор. 67–78
Sainov M.P., Talalaev N.S. Cutoff walls of tailing dams: A brief review.

Наука - производству Science for production

- Минин В.В., Кузнецов Г.А., Мальков А.Д.** Портативные гравитационные бетоносмесители бытового назначения на базе единой модульной платформы. 79–88
Minin V.V., Kuznetsov G.A., Malkov A.D. Portable gravitational concrete mixers for domestic purposes based on a single modular platform.
- Самойлова Н.В., Яшонков А.А., Крайнов А.М.** Анализ производственной эффективности серийных машин для порционирования рыбных продуктов. 89–100
Samojlova N.V., Yashonkov A.A., Krainov A.M. Analysis of production efficiency of serial machines for fish products slicing.

Научная статья
УДК 637.56:664.952

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОРМОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ФАРША КАЛЬМАРА С ДОБАВЛЕНИЕМ СТРУКТУРИРОВАННЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

Д.Л. Альшевский^{1,*}, М.Э. Мошарова¹, М.Н. Альшевская¹

¹ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

* E-mail: alshevsky@klgtu.ru

Аннотация. В исследовании рассмотрены качественные характеристики формованных изделий из фарша кальмара с добавлением структурированных наполнителей двух видов: на основе ферментированной кожицы кальмара и фарша из мантии кальмара. Изучено изменение показателя формоустойчивости фаршевых систем, а также органолептических и структурно-реологических свойств модельных образцов формованной продукции в состоянии кулинарной готовности, в зависимости от массовой доли наполнителей. Выявлено оптимальное соотношение наполнителя и фарша в составе формованной продукции — 50:50, обеспечивающее наилучшие органолептические и структурно-реологические характеристики. Предложенный способ позволяет эффективно использовать недоиспользуемые части кальмара, повысить качество продукции и снизить производственные расходы.

Ключевые слова: фарш кальмара; структурированный наполнитель; ферментированная кожица кальмара; комплексная пищевая добавка КФ Стабипро ФЭТ; формованные изделия.

Для цитирования: Альшевский Д.Л., Мошарова М.Э., Альшевская М.Н. Исследование качественных характеристик формованных изделий из фарша кальмара с добавлением структурированных наполнителей // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2025. Т. 11. № 2. С. 6–16.

Original article

STUDY OF QUALITY CHARACTERISTICS OF MOLDED PRODUCTS FROM MINCED SQUID WITH THE ADDITION OF STRUCTURED FILLERS

D.L. Alshevsky^{1,*}, M.E. Mosharova¹, M.N. Alshevskaya¹

¹ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

* E-mail: alshevsky@klgtu.ru

Abstract. The study examines the quality characteristics of molded squid mince products with the addition of two types of structured fillers: based on fermented squid skin and minced squid mantle. The change in the dimensional stability index of minced meat systems, as well as the organoleptic and structural-rheological properties of model samples of molded products in the state of culinary readiness, depending on the mass fraction of fillers, was studied. The optimal ratio of filler and mince in the composition of molded products was revealed - 50:50, providing the best organoleptic and structural-rheological characteristics. The proposed method allows for the efficient use of underutilized parts of squid, improving product quality and reducing production costs.

Key words: minced squid; structured filler; fermented squid skin; complex food additive KF Stabipro FET; molded products.

For citation: Alshevsky D.L., Mosharova M.E., Alshevskaya M.N. Study of quality characteristics of molded products from minced squid with the addition of structured fillers. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11. No. 2. pp. 6–16.

Введение

Современные тенденции в питании человека направлены на расширение рынка продукции, сочетающей в себе такие характеристики, как быстрое приготовление, высокая питательная ценность и экономическая доступность [1].

В рамках реализации концепции развития рыбохозяйственного комплекса перспективным направлением совершенствования технологий переработки водных биоресурсов является разработка и широкомасштабное применение методов глубокой переработки сырья, направленной на выпуск пищевых продуктов повышенной потребительской готовности (например, многофункциональных фаршевых изделий, кулинарных блюд из фарша и формованной продукции) [2].

Среди полуфабрикатов, производимых из объектов водного промысла, формованные продукты занимают особую нишу благодаря их относительно низкой себестоимости и высокой пищевой ценности. Для производства формованной продукции используются различные виды рыбы и морепродуктов, в том числе малоценное по товарным признакам сырьё и пищевые отходы их переработки [3]. На производственном этапе также возможно применение фаршевых композиций с включением растительных компонентов, структурообразующих добавок, которые способствуют приданию полуфабрикатам заданных структурно-механических свойств и обеспечивают стабильное качество выпускаемых продуктов [4,5]. Использование таких технологических решений позволяет целенаправленно регулировать реологические показатели, внешний вид и функциональные характеристики готовой продукции, что открывает возможность создания изделий с заранее определенными органолептическими свойствами [6].

Головоногие моллюски, в частности кальмары, классифицируются как ценный и диетический сырьевой ресурс, активно востребованный в сфере промышленного рыболовства. Способность образовывать плотные скопления, короткий жизненный цикл и быстрый рост обеспечивают эффективность их вылова. При этом кальмары отличаются превосходными органолептическими показателями, высокой питательной ценностью и значительным выходом готовой продукции – до 80% [7,8].

Фарш кальмара характеризуется низкой способностью к формованию ввиду наличия значительного количества водорастворимых белков, что вызывает деформацию и ухудшение внешнего вида продукта при тепловой обработке. В связи с этим актуальным представляется использование добавок, обеспечивающих сохранение стабильной структуры и привлекательного внешнего вида готовой продукции [9].

Ряд работ в научно-исследовательской литературе посвящен разработкам рецептур и технологий полуфабрикатов из фарша кальмара. Для улучшения формуемости изделий исследователями предлагается использование смеси сырого и вареного фарша кальмара, а также добавление растительных компонентов, что позволяет получить продукт с высокими органолептическими показателями [2,10]. Однако, к недостаткам таких технологий можно отнести значительное количество отходов при разделке кальмара (в том числе кожица), повышение себестоимости продукции, за счет увеличения энергозатрат на дополнительные технологические операции по переработке растительного сырья (мойка, чистка, тепловая обработка и т.д.).

В целях расширения ассортимента продуктов питания на основе фарша кальмара перспективным направлением является разработка новых технологических решений с

включением в рецептурные композиции структурированных добавок, полученных из малоиспользуемых частей кальмара.

Реализация методов комплексной переработки делает возможным использование кальмаров, имеющих механические повреждения, а также их щупалец и кожицы, что существенно сокращает объем отходов, уменьшает издержки производства и открывает возможности для расширения ассортимента ценнейших пищевых продуктов.

Целью работы являлось изучение показателей качества и структурно-реологических характеристик формованных изделий из фарша кальмара с добавлением структурированных наполнителей.

Задачи исследования:

- установить влияние массовой доли структурированного наполнителя в составе формованной продукции из фарша кальмара на органолептические показатели готового продукта;
- изучить структурно-реологические характеристики образцов формованной продукции из фарша кальмара с добавлением структурированных наполнителей в состоянии готовности к употреблению в пищу.

Объекты и методы исследований

Объектами исследований являлись: модельные образцы формованных изделий, изготовленные из фаршевой смеси на основе фарша из тушки Командорского кальмара (лат. *Berryteuthis magister*) с добавлением структурированных наполнителей (из ферментированной кожицы кальмара или фарша из тушки Командорского кальмара; комплексной пищевой добавки КФ Стабипро ФЭТ). Все используемое сырье, материалы и образцы, полученные в ходе проведения эксперимента, соответствовали требованиям нормативной документации по показателям безопасности (ТР ТС 021/2011, ТР ТС 029/2012, ТР ЕАЭС 040/2016).

Для приготовления фаршевой смеси тушка кальмара подвергалась дефростации и обесшкуриванию. Очищенная мантия кальмара измельчалась на волчке с диаметром отверстий в выходной ножевой решетке 3 мм.

Для приготовления структурированного наполнителя (К1) использовали ферментированную кожицу кальмара (23,75% от массы наполнителя), воду (71,25%) и комплексную пищевую добавку КФ Стабипро ФЭТ (5%). Структурированный наполнитель (К2) из фарша кальмара изготавливали из измельченной мантии (19%), комплексной пищевой добавки КФ Стабипро ФЭТ (5%) и воды (76%).

Технологические схемы приготовления структурированных наполнителей представлены на рисунке 1.

Полученные наполнители измельчали на волчке с диаметром отверстий в выходной ножевой решетке равной 3 мм и вносили в фарш кальмара в количестве 25; 50 и 75%. В качестве контрольного образца использовали фарш кальмара без добавления структурированных наполнителей.

В полученных образцах фаршевой смеси изучали способность к формованию по показателю формоустойчивости. Показатель формоустойчивости образцов определялся на сформованном изделии (массой 50 ± 1 г) после пяти минут выдержки при температуре $7 \pm 2^\circ\text{C}$ как отношение размера вертикального диаметра (Дв) к горизонтальному (Дг), выраженное в % (путем умножения полученного значения на 100).

Фаршевая смесь с различными видами (К1, К2) и массовой долей (25, 50, 75 %) наполнителей подвергалась формованию и доводилась до кулинарной готовности путем запекания при $t = 115 \pm 2^\circ\text{C}$ до достижения в центре изделий температуры $90 \pm 2^\circ\text{C}$.

В полученных модельных образцах формованных изделий изучали физические, органолептические и структурно-реологические свойства.

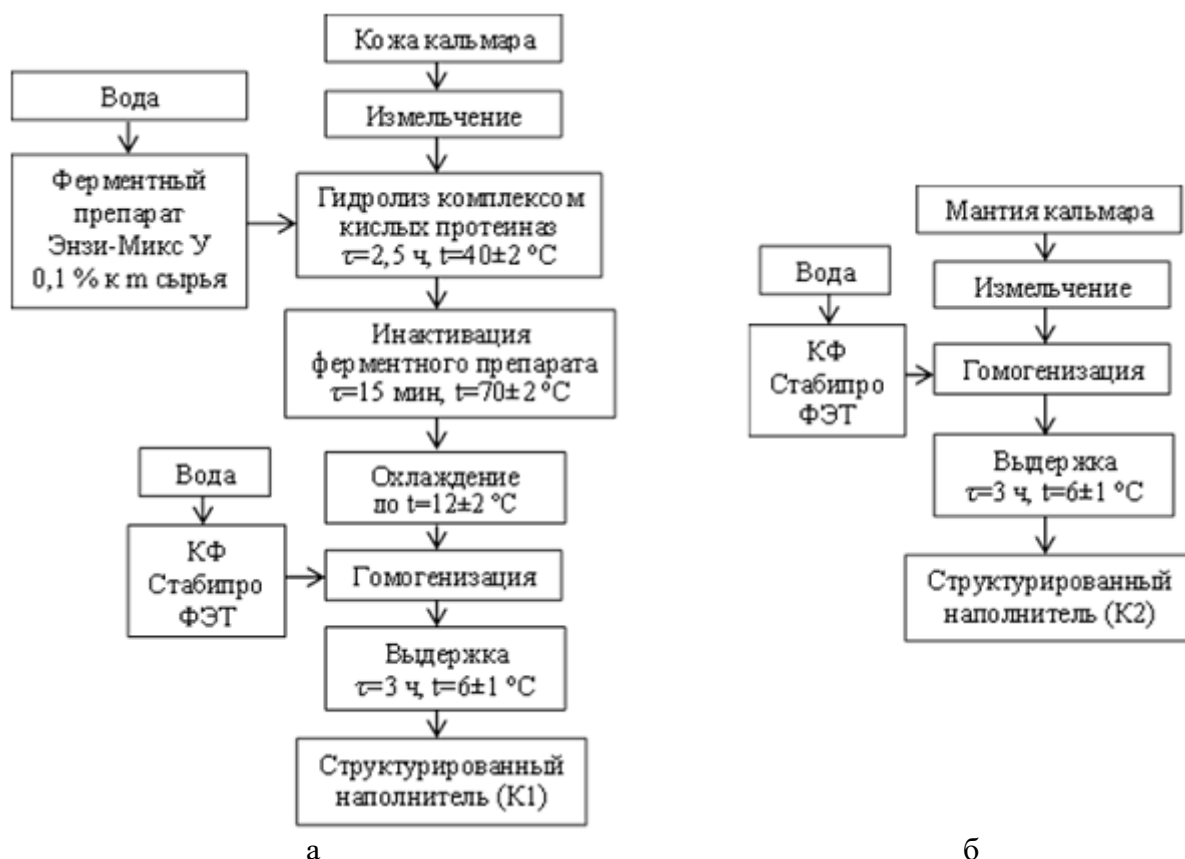


Рисунок 1 – Схема приготовления структурированных наполнителей:
а – на основе кожицы кальмара (K1), б – на основе фарша кальмара (K2)

Органолептические показатели определяли в соответствии с ГОСТ 7631 по разработанной балльной шкале, представленной в таблице 1.

Таблица 1 - Шкала органолептической оценки формованной продукции из фарша кальмара с добавлением структурированных наполнителей

Показатель	Характеристика показателя	Балл	Коэффициент значимости
внешний вид	форма изделий правильная, ровная, изделия одинаковые по размеру, недеформированные и не слипшиеся, поверхность продукта сухая	5	0,2
	форма изделий правильная, с незначительной деформацией	4	
	изделия существенно деформированы	3	
	изделия существенно деформированы, присутствуют механические повреждения (трещины, разломы) изделий	2	
	изделия существенно деформированы, слипшиеся, бесформенные	1	
вид на разрезе	однородный, равномерного цвета, свойственного кальмару и вносимому структурированному наполнителю	5	0,1
	однородный, равномерный, с небольшими отклонениями в тоне цвета	4	
	довольно однородный, равномерный	3	
	слабо однородный	2	
	не однородный	1	

консистенция	упругая, не крошливая, сочная, нежная	5	0,3
	слегка уплотненная, не достаточно сочная	4	
	плотная, суховатая	3	
	сухая, умеренно крошливая или мажущаяся	2	
	сухая, крошливая или излишне мажущаяся	1	
вкус	ярко выраженный, приятный, свойственный кальмару, без посторонних привкусов	5	0,2
	выраженный, приятный	4	
	слабо-выраженный	3	
	вкус не свойственный данному виду продукции	2	
	неприятный вкус, присутствие посторонних привкусов	1	
запах (аромат)	ярко-выраженный, приятный, свойственный данному виду продукции, с характерным ароматом кальмара, без постороннего запаха	5	0,2
	умеренно-выраженный, приятный	4	
	слабо-выраженный	3	
	запах, не свойственный данному виду продукции	2	
	неприятный запах, присутствие посторонних запахов	1	

Водоудерживающую способность (ВУС) определяли по ГОСТ 7636 (п. 3.9.5).

Структурно-реологические свойства определяли при помощи текстурометра Brookfield CT3 с использованием насадки TA52 (миниатюрное ножевое полотно, включающее в себя лезвие (7 мм (ширина), 20 мм (высота) и 0,5 мм (толщина)), со скоростью предварительного испытания 2,0 мм/с, скоростью испытания 1,0 мм/с, целевым показателем расстояния 5,0 мм и двумя циклами повторения.

Исследования проводились в 3-х кратной повторяемости. Математическая обработка результатов осуществлялась с помощью программного обеспечения Texture Loader и Microsoft Office 2016.

Основные результаты

Кальмары характеризуются высоким содержанием саркоплазматических белков (около 60 %) и низким уровнем миофибриллярных белков (примерно 30 %). Эта особенность определяет специфику мышечной ткани кальмара, проявляющуюся в изменении её консистенции — от плотной структуры в нативном состоянии до перехода в жидкую фазу после измельчения [11].

Для достижения приемлемых для формирования структурно-механических характеристик фарша из кальмара в качестве технологического решения предлагается вносить структурированные наполнители, созданные на основе вторичных ресурсов самого кальмара и комплексного стабилизатора пищевого назначения КФ Стабипро ФЭТ. Предполагается, что такой подход позволит обеспечить формирование фаршевых композиций с улучшенными технологическими свойствами, пригодными для производства продуктов заданной формы.

Показатель формоустойчивости позволяет объективно оценить способность фаршевой смеси сохранять заданную форму изделия до тепловой или холодильной обработки, а также в процессе доведения его до кулинарной готовности. На рис. 2 представлены изменения показателя формоустойчивости формованных изделий из фарша кальмара, в зависимости от вида и массовой доли структурированного наполнителя.

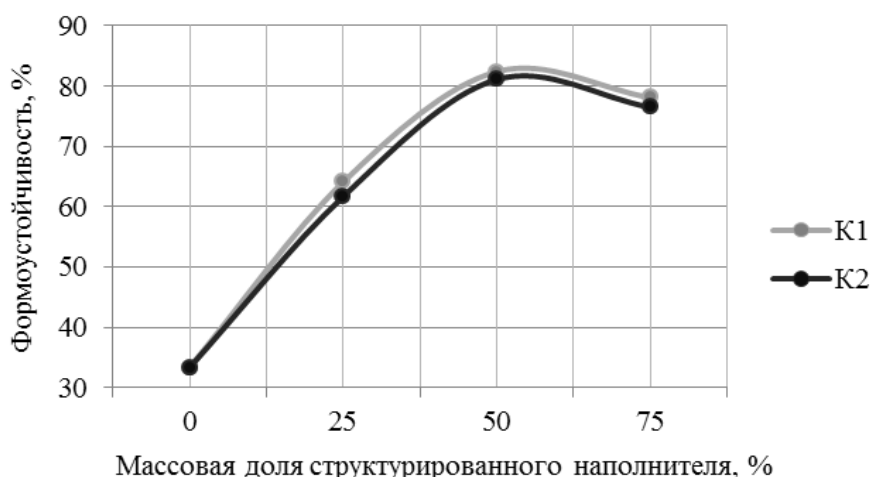


Рисунок 2 – Изменение формоустойчивости фаршевой смеси в зависимости от содержания в ней структурированного наполнителя, изготовленного из ферментированной кожицы кальмара (K1) и фарша кальмара (K2)

Из представленных на рис. 2 данных видно, что фарш из кальмара обладает низким показателем формоустойчивости, $33,4 \pm 1,1\%$. При формировании изделие характеризуется киселеобразной консистенцией, излишней липкостью (значительно прилипает к рабочей поверхности), не держит форму, растекается.

Фаршевая смесь с добавлением структурированных наполнителей в количестве 25 % характеризуется показателем формоустойчивости в диапазоне 60-65%. При формировании фарш прилипает к рабочей поверхности, плохо держит форму, что приведет к деформации изделий при дальнейших технологических операциях.

Фарши с добавлением структурированных наполнителей в количестве 75 % характеризуется высоким показателем формоустойчивости, в среднем 77 %, достаточно хорошо формируются, однако имеют рыхлую консистенцию, что может оказать отрицательное влияние на органолептические показатели готовой продукции.

Фаршевые смеси с массовой долей в составе структурированных наполнителей 50% обладают наилучшей формоустойчивостью, $82,4 \pm 2,7$ (K1) и $81,1 \pm 2,7$ (K2), имеют эластичную и упругую консистенцию фарша, при этом изделие не прилипает к рабочей поверхности, не крошится, готовый продукт отлично формируется и держит форму.

Для изучения влияния вида и массовой доли наполнителей на качественные и структурно-реологические характеристики формованных изделий, фаршевые смеси с наполнителями (K1, K2) (массовая доля наполнителей 0, 25, 50 и 70%) формовались и доводились до кулинарной готовности (температура в центре продукта $90 \pm 2^{\circ}\text{C}$).

Влияние вида и массовой доли наполнителей на выход готовых изделий после кулинарной обработки и влагоудерживающую способность представлено на рисунках 3,4.

Из представленных данных видно, что наибольшим показателем водоудерживающей способности и выходом обладают изделия со структурированным наполнителем из ферментированной кожицы кальмара, что вероятно связано с ее белковым составом, характеризующимся высоким содержанием коллагена. Формованные изделия с добавлением структурированных наполнителей в количестве 50 % обладают наиболее высоким показателем ВУС.

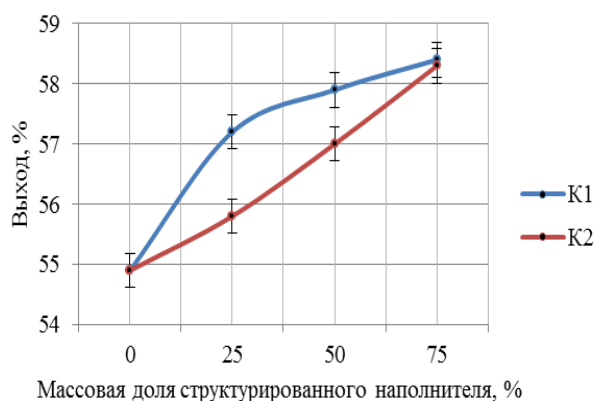


Рисунок 3 – Выход формованных изделий из фарша кальмара с добавлением структурированных наполнителей на основе ферментированной кожицы кальмара (K1) и фарша кальмара (K2) после тепловой обработки

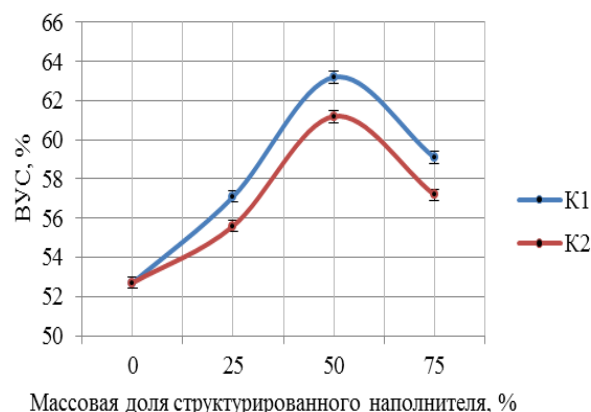


Рисунок 4 – ВУС формованных изделий из фарша кальмара с добавлением структурированных наполнителей на основе ферментированной кожицы кальмара (K1) и фарша кальмара (K2)

Наибольшим выходом в процессе тепловой обработки характеризовались изделия с добавлением 75 % структурированных наполнителей, однако данные образцы обладали низкими органолептическими характеристиками (рис. 5).

Влияние вида и массовой доли наполнителей на органолептические показатели образцов представлено на рис. 5.

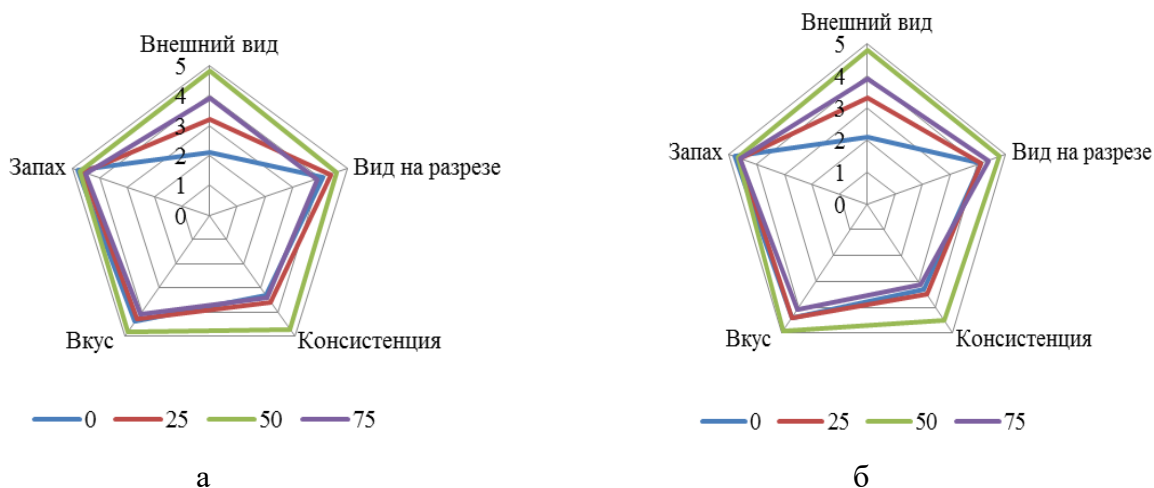


Рисунок 5 – Органолептические показатели модельных образцов формованных изделий из фарша кальмара в зависимости от массовой доли, %, структурированного наполнителя в составе фаршевой смеси:

а - изготовленного из ферментированной кожицы кальмара (K1), б - изготовленного из фарша кальмара (K2)

Из представленных на рисунке 5 данных видно, что вид рассматриваемых структурированных наполнителей не оказывает значительного влияния на такие органолептические показатели как вкус и запах в сравнении с контрольным образцом из фарша кальмара, вне зависимости от их количества в составе фаршевой смеси.

Наименьшую оценку по показателю «внешний вид» имеют контрольные образцы из фарша кальмара без добавления структурированных наполнителей, что коррелирует с показателем формоустойчивости. После тепловой обработки изделия становятся сильно деформированными и бесформенными. Изделия с добавлением структурированного наполнителя в количестве 50 %, вне зависимости от его вида, обладают наиболее привлекательным внешним видом.

Наиболее подвержен изменению, в зависимости от массовой доли структурированного наполнителя, такой органолептический показатель, как консистенция. Изделия без добавления наполнителей характеризуются плотной, суховатой и слегка крошливой консистенцией. Образцы с добавлением структурированных наполнителей в количестве 25 % и 75 %, также имеют невысокую органолептическую оценку по данному показателю. Добавление структурированного наполнителя в количестве 50 %, вне зависимости от его вида, придает формованной продукции упругую, не крошливую, сочную и нежную консистенцию, что соответствует высокой органолептической оценке по данному показателю.

Твердость (прочность) представляет собой способность продукта к сопротивлению при проникновении в его поверхность насадки текстурометра. Твердость (Н) характеризуется силой, необходимой для сжатия пищи между зубами.

Разжевываемость (мДж) характеризуется энергией, которая требуется для разжевывания твердого пищевого продукта до состояния, пригодного для проглатывания.

Изменение показателей твердости и разжевываемости модельных образцов формованных изделий в зависимости от вида и содержания в фаршевой смеси структурированного наполнителя, представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Показатели твердости и разжевываемости модельных образцов формованных изделий в зависимости от вида и содержания в фаршевой смеси структурированного наполнителя

Показатель	Образец/массовая доля наполнителя в продукте, %						
	K0	K1	K2	K1	K2	K1	K2
		25	25	50	50	75	75
Твердость, Н	1,05±0,05	1,19±0,06	1,25±0,06	1,40±0,07	1,45±0,07	0,90±0,04	0,87±0,04
Разжевываемость, мДж	2,41±0,12	2,90±0,14	3,16±0,16	3,10±0,16	3,32±0,17	1,71±0,09	2,05±0,10
K0 – фарш кальмара K1 - структурированный наполнитель из ферментированной кожицы кальмара K2 - структурированный наполнитель из фарша кальмара							

Изделия с добавлением структурированных наполнителей, в количестве 25 % и 50 %, обладают более высоким показателем твердости, что характеризуется более плотной консистенцией продукции в сравнении с контрольным образцом. Внесение структурированных наполнителей в количестве 75 %, наоборот приводит к сухой и крошливой консистенции, что характеризуется более низким показателем твердости продукции. Полученные данные коррелируют с органолептической оценкой образцов (рис. 5). Значения показателя разжевываемости формованных изделий с добавлением структурированных наполнителей коррелируют с показателями твердости, и органолептической оценкой консистенции образцов.

Таким образом, на основе полученных данных показана возможность использования структурированных наполнителей на основе фарша или ферментированной кожицы кальмара, с целью повышения выхода готовой продукции, показателя ВУС, а также улучшения структурно-реологических характеристик и органолептических показателей.

Выводы

Изучено влияние структурированных наполнителей на основе ферментированной кожицы и фарша кальмара на качественные характеристики формованных изделий.

Установлено, что формованные изделия с массовой долей 50 % структурированного наполнителя в составе, вне зависимости от вида, обладают лучшими органолептическими показателями и водоудерживающей способностью (61-63 %). Данные образцы формованной продукции также характеризуются наилучшими структурно-реологическими характеристиками, такими как, твердость (1,40-1,45 Н) и разжевываемость (3,10-3,32 мДж).

Таким образом, на основе проведенных исследований, можно сделать вывод, что оптимальное соотношение структурированного наполнителя, вне зависимости от его вида, и сырого фарша кальмара в фаршевой смеси для производства формованных изделий составляет 50:50.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кращенко В.В., Храмцова О.И. Исследование органолептических и реологических показателей фаршевых систем из кальмара командорского // Инновационное развитие рыбной отрасли в контексте обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации: Материалы VI Национальной научно-технической конференции (Владивосток, 22 декабря 2022 года). Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2023. С. 221-227.

2. Романова А.И., Ивченкова Е.Н., Альшевский Д.Л., Шендерюк В.И. Формованные полуфабрикаты из фарша кальмара // Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство. 2012. № 2. С. 171-177.

3. Галдукевич В.А., Андреев М.П. Разработка технологии комбинированного фаршевого продукта на основе маломерного и вторичного рыбного сырья // Технологии и продукты здорового питания: Сборник статей XII Национальной научно-практической конференции с международным участием (Саратов, 17-18 декабря 2020 года) / Под общей редакцией Н.В. Неповинных, О.М. Поповой, Е.В. Фатьянова. Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2021. С. 115-118.

4. Агеев О.В., Титова И.М., Бобков Я.В. Совершенствование рецептуры рыборастворительного полуфабриката с повышенным содержанием клетчатки // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2023. Т. 11, № 3. С. 55-63.

5. Мошарова М.Э., Титова И.М., Наумов В.А. Моделирование рецептов рыбных формованных полуфабрикатов с использованием вторичного сырья сокового производства // Вестник КамчатГТУ. 2023. № 66. С.8-17.

6. Мошарова М.Э., Титова И.М. Влияние растительных порошков, полученных из продуктов переработки плодоовощного сырья, на технологические свойства рыбных фаршей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. 2022. № 2. С. 115-120.

7. Подкорытова А.В., Слапогузова З.В. Головоногие моллюски и их переработка // Рыбное хозяйство. 2007. № 3. С. 99-102.

8. Храмцова О.И. Обоснование использования командорского кальмара в технологии формованных продуктов // Научный потенциал молодежи – развитию пищевых производств: Материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. Владивосток, 2022. С. 134-138/

9. Рябухо Е.Н., Битютская О.Е. Моделирование кулинарных изделий из фарша кальмаров // Общество, образование, наука в современных парадигмах развития: Материалы V Национальной научно-практической конференции (Керчь, 08-09 ноября 2024 года). Керчь: Керченский государственный морской технологический университет, 2024. С. 135-141.

10. Ивченкова Е.Н., Рудская А. И., Альшевский Д.Л. Формованные полуфабрикаты из фарша кальмара. Исследование функционально-технологических свойств фаршевой смеси // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 101. С. 1487-1499.

11. Жуков, А. В., Ефимова М.В. Исследование азотистых веществ кальмара как сырья для производства пресервов // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2011. № 15. С. 45-48.

REFERENCES

1. Krashchenko V.V., Hramcova O.I. *Issledovanie organolepticheskikh i reologicheskikh pokazatelej farshevykh sistem iz kal'mara komandorskogo* [Study of organoleptic and rheological parameters of minced systems from commander squid]. *Innovacionnoe razvitie rybnoy otrasli v kontekste obespecheniya prodovol'stvennoj bezopasnosti Rossijskoj Federacii: Materialy VI Nacional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii (Vladivostok, 22 dekabrya 2022 goda)*. Vladivostok: Dal'nevostochnyj gosudarstvennyj tekhnicheskij rybohozyajstvennyj universitet, 2023, pp. 221-227.

2. Romanova A.I., Ivchenkova E.N., Al'shevskij D.L., Shenderyuk V.I. *Formovannyye polufabrikaty iz farsha kal'mara* [Molded semi-finished products from squid mince]. *Vestnik AGTU. Seriya: Rybnoe hozyajstvo*. 2012. No. 2, pp. 171–177.

3. Galdukevich V.A., Andreev M.P. *Razrabotka tekhnologii kombinirovannogo farshevogo produkta na osnove malomernogo i vtorichnogo rybnogo syr'ya* [Development of technology for a combined minced product based on small-sized and secondary fish raw materials]. *Tekhnologii i produkty zdorovogo pitaniya: Sbornik statej XII Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem (Saratov, 17–18 dekabrya 2020 goda) / Pod obshchej redakciej N.V. Nepovinnyh, O.M. Popovoj, E.V. Fat'yanova*. Saratov: Saratovskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. N.I. Vavilova, 2021, pp. 115-118.

4. Ageev O.V., Titova I.M., Bobkov Ya.V. *Sovershenstvovanie receptury ryborastitel'nogo polufabrikata s povyshennym sodержaniem kletchatki* [Improvement of the recipe for a fish-vegetable semi-finished product with an increased fiber content]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pishchevye i biotekhnologii*. 2023. V. 11, No. 3, pp. 55-63.

5. Mosharova M.E., Titova I.M., Naumov V.A. *Modelirovanie receptur rybnykh formovannykh polufabrikatov s ispol'zovaniem vtorichnogo syr'ya sokovogo proizvodstva* [Modeling of recipes for fish molded semi-finished products using secondary raw materials from juice production]. *Vestnik KamchatGTU*. 2023. No. 66, pp.8-17.

6. Mosharova M.E., Titova I.M. *Vliyanie rastitel'nykh poroshkov, poluchennykh iz produktov pererabotki plodoovoshchnogo syr'ya, na tekhnologicheskie svoystva rybnykh farshej* [Influence of plant powders obtained from processed fruit and vegetable raw materials on the technological properties of minced fish]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe hozyajstvo*. 2022. No. 2, pp. 115-120.

7. Podkorytova A.V., Slapoguzova Z.V. *Golovonogie mollyuski i ih pererabotka* [Cephalopods and their processing]. *Rybnoe hozyajstvo*. 2007. No. 3, pp. 99-102.

8. Hramcova O.I. *Obosnovanie ispol'zovaniya komandorskogo kal'mara v tekhnologii formovannykh produktov* [Justification for the use of Commander squid in the technology of formed products]. *Nauchnyj potencial molodezhi – razvitiyu pishchevykh proizvodstv: Materialy VI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. Vladivostok, 2022, pp. 134–138.

9. Ryabuho E.N., Bityutskaya O.E. *Modelirovanie kulinarnykh izdelij iz farsha kal'marov* [Modeling of culinary products from squid mince]. *Obshchestvo, obrazovanie, nauka v sovremennykh paradigmah razvitiya: Materialy V Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii*

(Kerch', 08–09 noyabrya 2024 goda). Kerch': Kerchenskij gosudarstvennyj morskoy tekhnologicheskij universitet, 2024, pp. 135-141.

10. Ivchenkova E.N., Rudskaya A. I., Al'shevskij D.L. *Formovannye polufabrikaty iz farsha kal'mara. Issledovanie funkcional'no-tekhnologicheskikh svoystv farshevoj smesi* [Molded semi-finished products from squid mince. Study of the functional and technological properties of the minced meat mixture]. *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2014. No. 101, pp. 1487-1499.

11. Zhukov, A. V., Efimova, M.V. *Issledovanie azotistyh veshchestv kal'mara kak syr'ya dlya proizvodstva preservov* [Study of nitrogenous substances of squid as raw material for production of preserves]. *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. No. 15, pp. 45-48.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
<i>Альшевский Дмитрий Леонидович</i> – кандидат технических наук, доцент, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: alshevsky@klgtu.ru)	<i>Alshevsky Dmitry Leonidovich</i> – Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: alshevsky@klgtu.ru)
<i>Мошарова Маргарита Эдуардовна</i> – кандидат технических наук, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: margarita.mosharova@klgtu.ru)	<i>Mosharova Margarita Eduardovna</i> – Ph.D. (Eng), Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: margarita.mosharova@klgtu.ru)
<i>Альшевская Марина Николаевна</i> – кандидат технических наук, доцент, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: marina.alshevskaya@klgtu.ru)	<i>Alshevskaya Marina Nikolaevna</i> – Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: marina.alshevskaya@klgtu.ru)

Статья поступила в редакцию 29.04.2025; одобрена после рецензирования 12.05.2025, принята к публикации 16.05.2025.

The article was submitted 29.04.2025; approved after reviewing 12.05.2025; accepted for publication 16.05.2024.

Научная статья

УДК 664.9.022:664.8.022.6

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РОТОРНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ В ВИДЕ ЛОГАРИФМИЧЕСКОЙ И АРХИМЕДОВОЙ СПИРАЛЕЙ ПРИ РЕЗАНИИ ПИЩЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

О.В. Агеев^{1,*}¹ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

* E-mail: oleg.ageev@klgtu.ru

Аннотация. Показана актуальность развития теоретических основ процесса резания вязкоупругих пищевых материалов. Установлено, что при нарезке пищевых продуктов предпочтительным является наклонное движение кромки ножа относительно поверхности материала, которое всегда реализуется при плосковращательном рабочем движении режущего инструмента. По этой причине чаще всего кромки лезвий выполнены в виде логарифмической и архимедовой спиралей. Однако отсутствуют математические описания, позволяющие проанализировать и сравнить эффективность различных роторных рабочих органов. Целью работы является построение моделей, позволяющих рассчитать параметры резания при плосковращательном движении спиральных ножей. Получены формулы для вычисления угла скольжения и фактического угла резания спиральных лезвий в зависимости от конструктивного угла заточки и полярного угла ротора. Расчеты показывают, что у ножа в виде архимедовой спирали угол скольжения и фактический угол резания улучшаются по мере поворота ротора из начального положения к концу резания. В то же время, у лезвия, режущая кромка которого очерчена в виде логарифмической спирали, угол скольжения и фактический угол резания с изменением полярного угла являются постоянными величинами. Следовательно, при использовании ножа в форме логарифмической спирали за счет задания конструктивной постоянной s могут обеспечиваться более выгодные угол скольжения и фактический угол резания при любом угле поворота ротора. Сделан вывод, что роторный режущий орган с рабочей кромкой в виде логарифмической спирали в процессе нарезки пищевого материала более эффективен по сравнению с инструментом, форма которого очерчена в виде архимедовой спирали. Определено, что криволинейные роторные ножи являются более эффективными по сравнению с роторным режущим органом, снабженным прямолинейной рабочей кромкой. У лезвия в виде логарифмической спирали при конструктивном угле заточки 30 градусов и значениях конструктивной постоянной s 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1 фактический угол резания элементарного ножа составляет 14,48; 11,10; 9,42; 6,46; 3,29 градусов, соответственно. У инструмента в виде архимедовой спирали при конструктивном угле заточки 30 градусов и полярных углах 60; 120; 180; 240; 360 градусов фактический угол резания составляет 21,74; 13,97; 9,93; 7,64; 5,18 градусов, соответственно. Установленные зависимости угла скольжения и фактического угла резания от конструктивных параметров и полярного угла поворота роторных лезвий с различной формой кромки могут быть использованы при проектировании режущих приспособлений пищевых машин.

Ключевые слова: пищевой материал; ротационное резание; роторный нож; лезвие; ротор; угол скольжения; угол резания; угол заточки; архимедова спираль; логарифмическая спираль; полярный угол.

Для цитирования: Агеев О.В. Анализ эффективности роторных инструментов в виде логарифмической и архимедовой спиралей при резании пищевых материалов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2025. Т. 11. № 2. С. 17–30.

Original article

ANALYSIS OF ROTARY TOOLS EFFICIENCY IN THE FORM OF LOGARITHMIC AND ARCHIMEDEAN SPIRALS DURING FOOD MATERIALS CUTTINGO.V. Ageev^{1,*}¹ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

* E-mail: oleg.ageev@klgtu.ru

Abstract. The relevance of the development of the theory of viscoelastic food materials cutting is shown. During food products cutting, the knife edge inclined movement relative to the surface of the material is preferable, which with a flat-rotating working motion of the cutting tool is always realized. For this reason, most often the edges of the blades in the form of a logarithmic and archimedean spiral are made. However, mathematical descriptions that allow analyzing and comparing the efficiency of various rotary working bodies are missing. The purpose of the paper is models development for calculating the cutting parameters during flat-rotating motion of spiral knives. Formulas for calculating the sliding angle and the effective cutting angle of spiral blades depending on the constructive sharpening angle and the polar angle of the rotor are obtained. For a knife in the form of an archimedean spiral, the sliding angle and the effective cutting angle are improved when turning the rotor from the initial position to the end of cutting, which was shown by calculations. At the same time, for a blade with a cutting edge outlined in the form of a logarithmic spiral, the sliding angle and the effective cutting angle with a change in the polar angle are constant values. Consequently, when using a knife in the form of a logarithmic spiral, more advantageous sliding angle and effective cutting angle can be ensured at any angle of rotation of the rotor due to the setting of the design constant. A rotary cutting element with a working edge in the form of a logarithmic spiral is more effective in the process of food material cutting compared to a tool with the shape outlined in the form of an archimedean spiral. Curved rotary knives are more effective compared to a rotary cutting element equipped with a linear working edge. For a blade in the form of a logarithmic spiral with a constructive sharpening angle of 30 degrees and the values of the constructive constant of 0.5; 0.4; 0.3; 0.2; 0.1 the effective cutting angle of the elementary knife is 14.48; 11.10; 9.42; 6.46; 3.29 degrees, respectively. For a tool in the form of an archimedean spiral with a constructive sharpening angle of 30 degrees and polar angles of 60; 120; 180; 240; 360 degrees, the effective cutting angle is 21.74; 13.97; 9.93; 7.64; 5.18 degrees, respectively. The established dependencies of the sliding angle and the effective cutting angle on the design parameters and the polar angle of rotation of rotary blades with different edge shapes can be used when designing cutting devices for food machines.

Keywords: food material; rotary cutting; rotary knife; blade; rotor; sliding angle; cutting angle; sharpening angle; archimedean spiral; logarithmic spiral; polar angle.

For citation: Ageev O.V. Analysis of rotary tools efficiency in the form of logarithmic and archimedean spirals during food materials cutting. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11, No. 2, pp. 17–30.

Введение

Резание вязкоупругих и пластичных материалов является одним из наиболее широко распространенных технологических процессов в пищевых системах. Производительность и экономичность указанного процесса определяется технической оснащённостью, наличием эффективного оборудования и инструмента, а также необходимой степенью автоматизации. В настоящее время наибольшее распространение имеют технологические машины и аппараты, в которых резание и измельчение осуществляются за счёт механического воздействия лезвия на пищевой материал. При этом процесс характеризуется как механическое разделение продукта на части, сопровождающееся под влиянием

напряженного состояния местным разрушением волокон материала в требуемом направлении. Следует отметить, что напряженное состояние волокон достигается посредством сосредоточения (концентрации) силовых факторов в зоне лезвия при взаимодействии между режущей кромкой ножа и продуктом. При реализации данного технологического процесса на производительность, точность и качество линии резания существенным образом влияют геометрические параметры режущего органа.

Заметим, что в последние годы интенсивно развивается новый раздел пищевых систем – теория резания вязкоупругих и пластичных материалов [1-3]. Это вызвано важными практическими приложениями в задачах проектирования новой техники и машинных технологий переработки пищевого сырья. Изучение механики и физики разрушения вышеуказанных материалов, а также выбор эффективных режущих органов представляет собой сложную научную проблему и развивается по нескольким направлениям, каждое из которых имеет свою специфику и характерные особенности – как с точки зрения теоретического описания, так и экспериментальных наблюдений [4-6]. Механико-математические описания, формируемые в рамках теории резания пищевых материалов, являются основой для постановки и решения задач аналитической оптимизации геометрии рабочих органов технологических машин [7].

Исследованию процессов механической обработки пищевых материалов на базе прогрессивных средств технологического оснащения посвящен обширный ряд работ в России и за рубежом. D.A.S. Lima, M.M.F. Santos, A.M.B.L. Sousa с соавторами [8, 9] исследовали процесс резания замороженных блоков рыбы на ленточнопильной технологической машине и анализировали показатели качества готового продукта. Н. Azarmdel, S.S. Mohtasebi, A. Jafari и соавторы [10] разработали компьютерную систему для ресурсосберегающей обработки тушек форели. Исследователи W. Karłonek, K. Nadolny, B. Zieliński с соавторами [11] анализировали процессы износа и восстановления поверхности лезвийных инструментов, используемых в машинах для филетирования камбаловых рыб.

Е. Bar, J.R. Mathiassen, A. Eilertsen и соавторы [12] предложили концептуальный подход к автоматизированной обработке филе лосося режущими органами, смонтированными на выходном звене промышленного робота-манипулятора. В обзорной работе W. Xu, Y. He, J. Li и соавторов [13] проанализировано современное состояние автоматизации и роботизации механической обработки мясного сырья на поточных линиях. Исследователи X. Zhang, Z. Gong, X. Liang с соавторами [14] использовали лазерную сканирующую систему и разработали программное обеспечение при проектировании машины для обезглавливания рыбы. Работа S. Song, Z. Liu, M. Huang и коллег [15] направлена на повышение эффективности производства порционированного рыбного филе за счет выявления костных включений методом гиперспектральной рамановской визуализации. Отдельное направление представляет работа M.B. Kasperowicz, G.P. Chomka, T. Bil [16], посвященная ресурсосберегающему резанию рыбного филе радужной форели высокоэнергетической струей воды.

Вышеприведенный литературный обзор показывает, что при резании пищевых продуктов предпочтительным является наклонное движение режущей кромки относительно поверхности материала. При этом обеспечиваются меньшее смятие продукта, сокращение потерь сока и пористости, а также лучшее сохранение вкусовых и товарных качеств. Это обуславливается действием ряда факторов, среди которых следует выделить следующие: трансформация угла заточки лезвия [17]; перенос части силы трения материала о грани ножа с нормального к лезвию направления на касательное [7]; пилящее воздействие микрорубьев лезвия на продукт. Указанные положительные эффекты реализуются при плосковращательном рабочем движении режущего инструмента относительно материала, суть ротационном резании. При криволинейной форме кромки роторного режущего органа всегда обеспечивается режим наклонного резания. В связи с этим, в технологических

машинах для нарезки пищевых продуктов получили распространение фигурные лезвия, режущая кромка которых очерчена в виде плоских кривых линий.

Следует отметить, что при выборе геометрии и расчете конструктивного профиля роторного ножа принимаются во внимание следующие решающие параметры процесса ротационного резания: угол скольжения элементарного ножа τ и фактический угол резания элементарного ножа α_{ϕ} . С точки зрения обеспечения качества резания необходимо, чтобы при повороте рабочего органа на некоторый полярный угол θ относительно оси вращения угол скольжения увеличивался, а фактический угол резания снижался. Это связано с тем, что от величины данных углов непосредственно зависят силы сопротивлений, действующие со стороны материала на инструмент. С учетом данного обстоятельства, в режущих машинах и аппаратах находят широкое применение роторные лезвия, кромка которых очерчена в виде эксцентрической окружности, а также в виде логарифмической и архимедовой спиралей. Отметим, что значительно реже встречаются роторные инструменты с фигурной рабочей кромкой в виде эллипса, параболы, гиперболической спирали, развертки окружности, инверсии развертки окружности, кривой с постоянным углом защемления и другие. Наименьшей эффективностью обладает роторное лезвие с кромкой в виде прямой линии.

Заметим, что параметры ротационного резания пищевого материала рабочим органом в форме эксцентрика исследованы в диссертации Самойловой Н.В. [18]. С учетом технологичности изготовления такого ножа в форме диска [19] обоснована целесообразность его применения в порционирующем оборудовании. Распространенными являются два различных мнения, что наилучшей формой роторного режущего органа является соответственно логарифмическая или архимедова спираль. Однако до настоящего времени в научной литературе отсутствуют математические описания, позволяющие аналитически определить параметры ротационного резания пищевых материалов фигурными лезвиями в виде логарифмической и архимедовой спиралей, имеющими большое значение при проектировании пищевых машин. Несмотря на значительное количество выпускаемых моделей продукторезательных машин с рабочими органами криволинейной формы, это говорит о том, что применяемая на практике геометрия инструментов не всегда является наилучшей и научно обоснованной. Имеется настоятельная необходимость проанализировать эффективность роторных рабочих органов, кромка которых очерчена в виде вышеперечисленных плоских кривых.

В связи с этим, целью настоящей статьи является разработка моделей, позволяющих рассчитать угол скольжения и фактический угол резания при плосковращательном движении указанных роторных рабочих органов, что позволит оценить эффективность и обоснованно определять геометрию режущих инструментов технологического оборудования. Кроме того, знание зависимостей указанных параметров от угла поворота роторного ножа также позволит конструктору выбрать местоположение нарезаемого продукта (продуктового окна) в проектируемом устройстве так, чтобы оно наилучшим образом отвечало требованиям технологии в отношении оптимальных для заданного продукта режимов резания.

Математическое моделирование параметров резания роторным рабочим органом с режущей кромкой в виде плоской кривой

Рассмотрим процесс ротационного резания пищевого материала ножом, кромка которого очерчена в виде плоской кривой (рисунок 1). Поместим ось вращения рабочего органа в точку O , которая одновременно является центром полярной системы координат. Очевидно, что вследствие кривизны лезвия в каждой его точке угол заточки элементарного ножа будет трансформирован: $\alpha_{\phi} < \alpha$, где α_{ϕ} - фактический угол резания; α - конструктивный угол заточки ножа. Пусть плоская кривая представляет собой логарифмическую спираль, уравнение которой в полярных координатах записывается следующим образом:

$$r = r_0 \cdot e^{c \cdot \theta}, \quad (1)$$

где r - радиус-вектор; θ - полярный угол; r_0 , c - постоянные величины, значения которых выбираются по конструктивным соображениям.

Как видно из рисунка 1, угол скольжения τ элементарного ножа в произвольной точке режущей кромки – это угол, который составляет касательный вектор к спирали с радиус-вектором. Кроме того, в теории резания рассматривается угол защемления χ – угол между касательным вектором и полярной осью: $\chi = \tau + \theta$. Декартовы координаты точки E на режущей кромке есть

$$x = r_0 \cdot e^{c \cdot \theta} \cdot \cos \theta; \quad (2)$$

$$y = r_0 \cdot e^{c \cdot \theta} \cdot \sin \theta. \quad (3)$$

Производные декартовых координат точки E по полярному углу имеют вид:

$$\frac{dx}{d\theta} = c \cdot r_0 \cdot e^{c \cdot \theta} \cdot \cos \theta - r_0 \cdot e^{c \cdot \theta} \cdot \sin \theta; \quad (4)$$

$$\frac{dy}{d\theta} = c \cdot r_0 \cdot e^{c \cdot \theta} \cdot \sin \theta + r_0 \cdot e^{c \cdot \theta} \cdot \cos \theta. \quad (5)$$

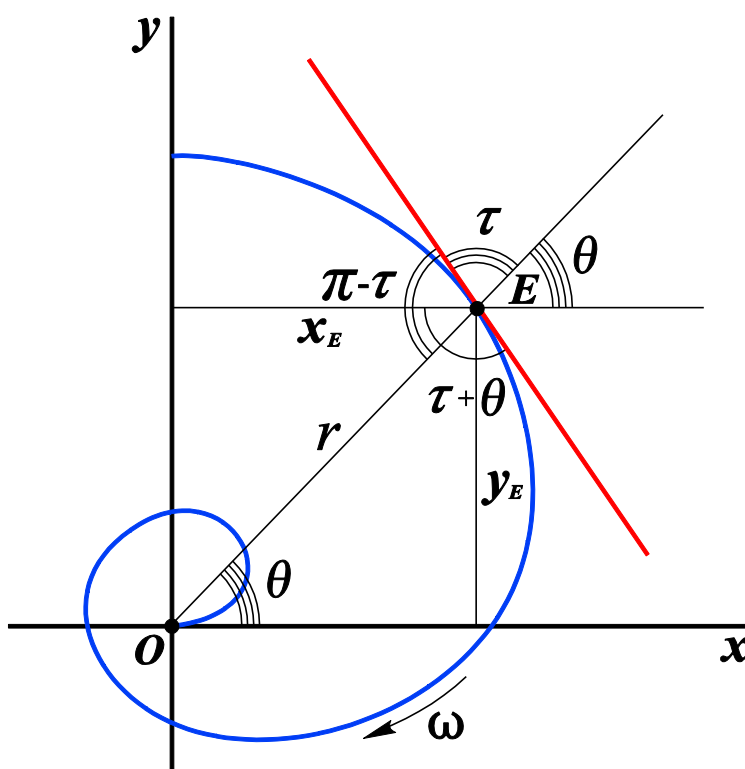


Рисунок 1 – Схема резания материала роторным ножом с фигурной кромкой в виде плоской спирали

Из выражений (4) и (5) находим:

$$\left(\frac{dx}{d\theta}\right)^2 = r_0^2 \cdot e^{2 \cdot c \cdot \theta} \cdot (c^2 \cdot \cos^2 \theta - 2 \cdot c \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + \sin^2 \theta); \quad (6)$$

$$\left(\frac{dy}{d\theta}\right)^2 = r_0^2 \cdot e^{2 \cdot c \cdot \theta} \cdot (c^2 \cdot \sin^2 \theta + 2 \cdot c \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + \cos^2 \theta). \quad (7)$$

С учетом (6) и (7) получим:

$$\frac{dr}{d\theta} = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\theta}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\theta}\right)^2} = \sqrt{r_0^2 \cdot e^{2 \cdot c \cdot \theta} \cdot (c^2 + 1)} = r_0 \cdot e^{c \cdot \theta} \cdot \sqrt{(c^2 + 1)}. \quad (8)$$

Для единичного касательного вектора к логарифмической спирали справедливо:

$$\cos(\tau + \theta) = \frac{dx/d\theta}{dr/d\theta} = \frac{c \cdot r_0 \cdot e^{c \cdot \theta} \cdot \cos \theta - r_0 \cdot e^{c \cdot \theta} \cdot \sin \theta}{r_0 \cdot e^{c \cdot \theta} \cdot \sqrt{(c^2 + 1)}} = \frac{c \cdot \cos \theta - \sin \theta}{\sqrt{(c^2 + 1)}}; \quad (9)$$

$$\sin(\tau + \theta) = \frac{dy/d\theta}{dr/d\theta} = \frac{c \cdot r_0 \cdot e^{c \cdot \theta} \cdot \sin \theta + r_0 \cdot e^{c \cdot \theta} \cdot \cos \theta}{r_0 \cdot e^{c \cdot \theta} \cdot \sqrt{(c^2 + 1)}} = \frac{c \cdot \sin \theta + \cos \theta}{\sqrt{(c^2 + 1)}}. \quad (10)$$

Одновременно справедливы выражения:

$$\cos(\tau + \theta) = \cos \tau \cdot \cos \theta - \sin \tau \cdot \sin \theta; \quad (11)$$

$$\sin(\tau + \theta) = \sin \tau \cdot \cos \theta + \cos \tau \cdot \sin \theta. \quad (12)$$

Тогда из формул (9)-(12) получим:

$$\frac{c \cdot \cos \theta - \sin \theta}{\sqrt{(c^2 + 1)}} = \cos \tau \cdot \cos \theta - \sin \tau \cdot \sin \theta; \quad (13)$$

$$\frac{c \cdot \sin \theta + \cos \theta}{\sqrt{(c^2 + 1)}} = \sin \tau \cdot \cos \theta + \cos \tau \cdot \sin \theta. \quad (14)$$

Из выражений (13) и (14) следует:

$$\cos \tau = \frac{c}{\sqrt{(c^2 + 1)}}; \sin \tau = \frac{1}{\sqrt{(c^2 + 1)}}, \quad (15)$$

откуда имеем:

$$\operatorname{ctg} \tau = \frac{c \cdot \sqrt{(c^2 + 1)}}{\sqrt{(c^2 + 1)}} = c. \quad (16)$$

Выражение для тангенса фактического угла резания элементарного ножа имеет следующий вид [18, 20]:

$$\operatorname{tg} \alpha_{\phi} = \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \tau. \quad (17)$$

С учетом формул (15) и (16) получим:

$$\alpha_{\phi} = \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{c}{\sqrt{(c^2 + 1)}} \right) = \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{\operatorname{ctg} \tau}{\sqrt{(\operatorname{ctg}^2 \tau + 1)}} \right) = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{(\operatorname{tg}^2 \tau + 1)}} \right). \quad (18)$$

Анализ выражений (16) и (18) показывает, что при ротационном резании лезвием, режущая кромка которого очерчена в виде логарифмической спирали, угол скольжения и фактический угол резания с изменением полярного угла являются постоянными величинами.

Далее рассмотрим лезвие, режущая кромка которого очерчена в виде архимедовой спирали. Уравнение данной плоской кривой в полярных координатах записывается следующим образом:

$$r = c_0 \cdot \theta, \quad (19)$$

где r - радиус-вектор; θ - полярный угол ротора; c_0 - постоянная величина, значение которой выбирается по конструктивным соображениям.

Декартовы координаты точки E на режущей кромке есть

$$x = c_0 \cdot \theta \cdot \cos \theta; \quad (20)$$

$$y = c_0 \cdot \theta \cdot \sin \theta. \quad (21)$$

Производные декартовых координат точки E по полярному углу имеют вид:

$$\frac{dx}{d\theta} = c_0 \cdot \cos \theta - c_0 \cdot \theta \cdot \sin \theta; \quad (22)$$

$$\frac{dy}{d\theta} = c_0 \cdot \sin \theta + c_0 \cdot \theta \cdot \cos \theta. \quad (23)$$

Из выражений (22) и (23) получим:

$$\left(\frac{dx}{d\theta} \right)^2 = c_0^2 \cdot (\cos^2 \theta - 2 \cdot \theta \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + \theta^2 \cdot \sin^2 \theta); \quad (24)$$

$$\left(\frac{dy}{d\theta} \right)^2 = c_0^2 \cdot (\sin^2 \theta + 2 \cdot \theta \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + \theta^2 \cdot \cos^2 \theta). \quad (25)$$

С учетом (24) и (25) получим:

$$\frac{dr}{d\theta} = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\theta} \right)^2 + \left(\frac{dy}{d\theta} \right)^2} = \sqrt{c_0^2 \cdot (\theta^2 + 1)} = c_0 \cdot \sqrt{(\theta^2 + 1)}. \quad (26)$$

Для единичного касательного вектора к архимедовой спирали справедливо:

$$\cos(\tau + \theta) = \frac{dx/d\theta}{dr/d\theta} = \frac{c_0 \cdot \cos \theta - c_0 \cdot \theta \cdot \sin \theta}{c_0 \cdot \sqrt{(\theta^2 + 1)}} = \frac{\cos \theta - \theta \cdot \sin \theta}{\sqrt{(\theta^2 + 1)}}; \quad (27)$$

$$\sin(\tau + \theta) = \frac{dy/d\theta}{dr/d\theta} = \frac{c_0 \cdot \sin \theta + c_0 \cdot \theta \cdot \cos \theta}{c_0 \cdot \sqrt{(\theta^2 + 1)}} = \frac{\sin \theta + \theta \cdot \cos \theta}{\sqrt{(\theta^2 + 1)}}. \quad (28)$$

Тогда с учетом формул (9), (10) и (27), (28) получим:

$$\frac{\cos \theta - \theta \cdot \sin \theta}{\sqrt{(\theta^2 + 1)}} = \cos \tau \cdot \cos \theta - \sin \tau \cdot \sin \theta; \quad (29)$$

$$\frac{\sin \theta + \theta \cdot \cos \theta}{\sqrt{(\theta^2 + 1)}} = \sin \tau \cdot \cos \theta + \cos \tau \cdot \sin \theta. \quad (30)$$

Из выражений (29) и (30) следует:

$$\cos \tau = \frac{1}{\sqrt{(\theta^2 + 1)}}; \sin \tau = \frac{\theta}{\sqrt{(\theta^2 + 1)}}, \quad (31)$$

откуда имеем:

$$\operatorname{tg} \tau = \frac{\theta \cdot \sqrt{(\theta^2 + 1)}}{\sqrt{(\theta^2 + 1)}} = \theta; \tau = \operatorname{arctg}(\theta). \quad (32)$$

С учетом формул (17) и (31) получим:

$$\alpha_\phi = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{(\theta^2 + 1)}} \right). \quad (33)$$

Результаты расчетов параметров резания роторным рабочим органом с режущей кромкой в виде плоской кривой

Выражение (17) позволяет изучить зависимости фактического угла резания α_ϕ ножа, кромка которого выполнена в виде логарифмической спирали, от конструктивного угла заточки α и постоянной величины c . На рисунке 2 приведен контурный график, иллюстрирующий данные зависимости для указанного вида лезвия.

Рисунок 2 иллюстрирует, что при постоянном конструктивном угле заточки α роторного ножа со снижением конструктивной постоянной величины c фактический угол резания α_ϕ элементарного ножа монотонно и нелинейно сокращается. Таким образом, для повышения эффективности процесса ротационного резания при проектировании профиля лезвия целесообразно выбирать малые значения постоянной: $c < 1$.

Отметим, что при значении постоянной $c = \operatorname{ctg} \tau = 1$ форма кромки рабочего органа описывается выражением $r = r_0 \cdot e^\theta$, а угол скольжения элементарного ножа составляет $\tau = 45^\circ$. В этом случае фактический угол резания определяется следующим образом:

$\alpha_{\phi} = \arctg\left(\frac{tg\alpha}{\sqrt{2}}\right)$. Например, с конструктивным углом заточки лезвия $\alpha = 30^{\circ}$ фактический угол резания элементарного ножа при повороте ротора на любой полярный угол составляет $\alpha_{\phi} = \arctg\left(\frac{tg30^{\circ}}{\sqrt{2}}\right) = 22,21^{\circ}$. Согласно рисунку 2, при конструктивном угле заточки $\alpha = 30^{\circ}$ и значениях постоянной c 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1 фактический угол резания α_{ϕ} элементарного ножа составляет: 14,48°; 11,10°; 9,42°; 6,46°; 3,29°, соответственно.

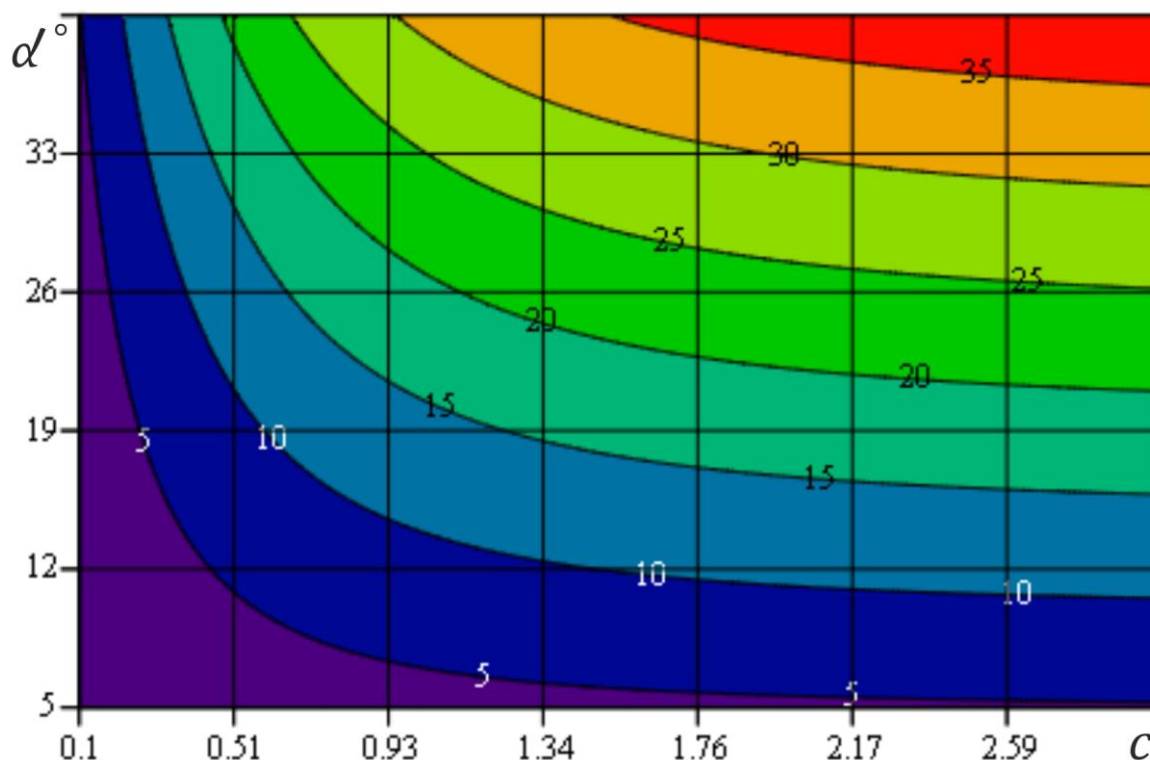


Рисунок 2 - Зависимости фактического угла резания α_{ϕ} роторного ножа в виде логарифмической спирали от конструктивного угла заточки α и постоянной c

Наряду с вышеизложенным, на основе выражения (32) представляется возможным определить зависимость угла скольжения τ ножа, режущая кромка которого выполнена в виде архимедовой спирали, от полярного угла θ . Полученная формула (33) также позволяет установить зависимость фактического угла резания α_{ϕ} элементарного ножа от полярного угла θ . Результаты моделирования показаны на рисунке 3.

На рисунке 3,а для роторного ножа в виде архимедовой спирали приведены результаты расчетов угла скольжения в зависимости от полярного угла. На рисунке 3,б представлены результаты расчетов фактического угла резания указанного рабочего органа в зависимости от полярного угла.

Рисунок 3,а демонстрирует, что угол скольжения роторного ножа с увеличением полярного угла θ в диапазоне от 0 до 360° монотонно и нелинейно возрастает. Рисунок 3,б показывает, что фактический угол резания в том же диапазоне полярных углов монотонно и нелинейно снижается от исходной величины конструктивного угла заточки α . Согласно рисунку 3,б, при конструктивном угле заточки $\alpha = 30^{\circ}$ фактический угол резания α_{ϕ} элементарного ножа с поворотом ротора на полярные углы 60°; 120°; 180°; 240°; 360° составляет: 21,74°; 13,97°; 9,93°; 7,64°; 5,18°, соответственно. Таким образом, при указанных

параметрах фактической угол резания сокращается практически в пять с половиной раз, что положительно влияет на эффективность ротационного резания пищевого материала.

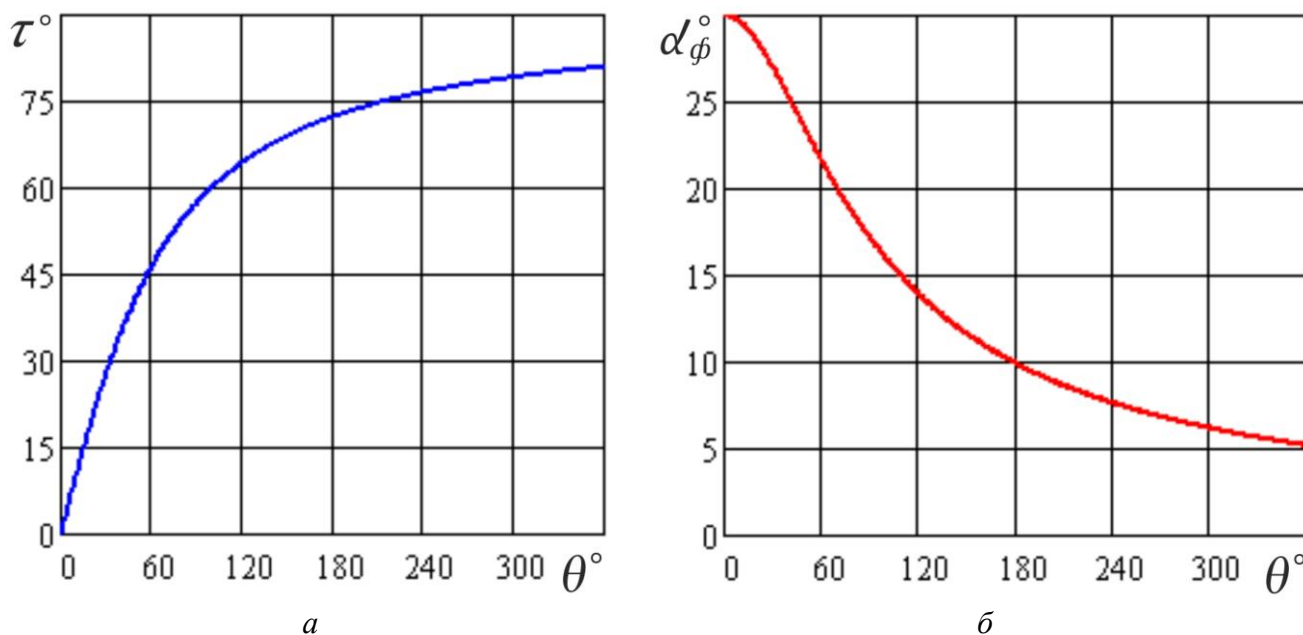


Рисунок 3 - Зависимости углов резания роторного ножа в виде архимедовой спирали от полярного угла ротора ($\alpha = 30^\circ$).

a – зависимость угла скольжения τ элементарного ножа от полярного угла ротора;

b – зависимость фактического угла резания α_ϕ элементарного ножа от полярного угла ротора.

Несложные преобразования показывают, что у роторного ножа, кромка которого выполнена в виде прямой линии, с увеличением полярного угла и прохождением продуктового окна фактический угол резания возрастает от малого значения до величины конструктивного угла заточки, а угол скольжения, наоборот, к концу резания сокращается до нуля:

$$\alpha_\phi = \arctg \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{(\operatorname{ctg}^2 \theta + 1)}} \right); \quad (34)$$

$$\tau = \arctg(\operatorname{ctg} \theta). \quad (35)$$

Данное обстоятельство дополнительно иллюстрирует, что использование криволинейных роторных лезвий предпочтительнее применения режущих инструментов с прямолинейной рабочей кромкой.

Заключение

Полученные математические модели и рассчитанные значения параметров процесса резания показывают, что у роторного ножа в виде архимедовой спирали угол скольжения и фактический угол резания улучшаются по мере поворота ротора из начального положения к концу резания. В то же время, при использовании лезвия в форме логарифмической спирали за счет задания конструктивной постоянной $c = \operatorname{ctg} \tau$ могут обеспечиваться выгодные большой угол скольжения и малый фактический угол резания при любом угле поворота ротора, особенно при $c < 1$. Это позволяет считать, что роторный режущий орган с рабочей

кромкой в виде логарифмической спирали в процессе резания пищевого материала более эффективен по сравнению с инструментом, форма которого очерчена в виде архимедовой спирали, особенно при малых полярных углах ротора. Кроме того, оба рассмотренных криволинейных роторных ножа являются существенно более эффективными по сравнению с режущим органом, снабженным прямолинейной рабочей кромкой.

Установленные зависимости угла скольжения и фактического угла резания от конструктивных параметров и полярного угла поворота роторных лезвий с различной формой кромки могут быть рекомендованы для использования при проектировании режущих приспособлений пищевых машин [21, 22, 23]. Направлением дальнейших исследований является разработка математических моделей, позволяющих рассчитать силы сопротивлений, действующие на роторные рабочие органы при резании пищевых материалов [24, 25].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Boisly M., Schuldt S., Kaestner M.G., Schneider Y., Rohm H. Experimental characterization and numerical modeling of cutting processes in viscoelastic solids // *Journal of Food Engineering*. 2016. No. 191. P. 1-9.
2. Schuldt S., Schneider Y., Rohm H. High-speed cutting of foods: Cutting behavior and initial cutting forces // *Journal of Food Engineering*. 2018. No. 230. P. 55-62.
3. Агеев О.В. Математическое моделирование сил нормального контактного давления на грани двухкромочного ножа при резании рыбы / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов, Н.В. Самойлова // *Известия Калининградского государственного технического университета*. 2018. № 50. С. 81-102.
4. Агеев О.В. Математическое моделирование сил полезного сопротивления при резании охлажденных пищевых продуктов / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов // *Вестник Международной академии холода*. 2020. № 3. С. 70-82.
5. Агеев О.В. Математическое моделирование сил нормального контактного давления на боковые грани ножа при резании пищевых материалов / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов // *Научный журнал Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств*. 2017. № 4. С. 27-42.
6. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov J.A. Mathematical modeling of the resistance force of the profile of a flat-back knife // *Journal of Friction and Wear*. 2019. Vol. 40, No. 6. P. 580-587.
7. Агеев О.В. Подход к расчету деформационной силы трения при резании охлажденной рыбы / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов, Н.В. Самойлова // *Вестник Международной академии холода*. 2019. № 4. С. 49-56.
8. Lima D. A. S., Santos M. M. F., Sousa A. M. B. L., Bezerra T. K. A., da Silva Araujo H. B., Madruga M. S., da Silva F. A. P. The cutting by-product of fish filleting on the band saw machine: Nutritional quality and technological potential // *Waste Biomass Valorization*. 2022. No. 13(11). P. 4575-4584.
9. Lima D. A. S., Santos M. M. F., Duval R. L. F., Bezerra T. K. A., Araujo I. B. D., Madruga M. S., da Silva F. A. P. Technological properties of protein hydrolysate from the cutting byproduct of serra Spanish mackerel (*Scomberomorus brasiliensis*) // *Journal of Food Science and Technology-Mysore*. 2021. No. 58(8). P. 2952-2962.
10. Azarmdel H., Mohtasebi S. S., Jafari A., Rosado Mucoz A. Developing an orientation and cutting point determination algorithm for a trout fish processing system using machine vision // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. No. 162. P. 613-629.
11. Kapłonek W., Nadolny K., Zieliński B., Plichta J., Pimenov D. Y., Sharma S. The Role of Observation-Measurement Methods in the Surface Characterization of X39Cr13 Stainless-Steel Cutting Blades Used in the Fish Processing Industry // *Materials*. 2020. No. 13(24). P. 5796.

12. Bar E., Mathiassen J. R., Eilertsen A., Mugaas T., Misimi E., Linnerud E. S., Salomonsen C., Westavik H. J. I. R. A. I. J. Towards robotic post-trimming of salmon fillets // *Industrial Robot: An International Journal*. 2016. No. 43(4). P. 421–428.
13. Xu W., He Y., Li J., Zhou J., Xu E., Wang W., Liu D. Robotization and intelligent digital systems in the meat cutting industry: From the perspectives of robotic cutting, perception, and digital development // *Trends in Food Science & Technology*. 2023. No. 135. P. 234–251.
14. Zhang X., Gong Z., Liang X., Sun W., Ma J., Wang H. Line Laser Scanning Combined with Machine Learning for Fish Head Cutting Position Identification // *Foods*. 2023. No. 12(24). P. 4518.
15. Song S., Liu Z., Huang M., Zhu Q., Qin J., Kim M. S. Detection of fish bones in fillets by Raman hyperspectral imaging technology // *Journal of Food Engineering*. 2020. No. 272. P. 109808.
16. Kasperowicz Maciej B., Chomka Grzegorz P., Bil Tadeusz. Determination of Supply Pressure during Cutting Fish Using High-Pressure Water Stream Taking into Account the Cutting Place and Diameter of the Water Nozzle // *International Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 16, No. 3. P. 20180395.
17. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M., Piepiórka-Stepuk J., Samojlova N.V., Jakubowski M. Increasing the Efficiency of Food Materials Cutting during Inclined and Shear Movements of Knife // *Materials*. 2022. Vol. 15. P. 289.
18. Самойлова, Н.В. Совершенствование процесса и оборудования для порционирования рыбы: специальность 4.3.3 «Пищевые системы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Самойлова Наталья Владимировна, 2024. – 282 с.
19. Агеев О.В. Совершенствование технологии производства дисковых ножей рыбоперерабатывающих машин / О.В. Агеев, С.Б. Перетятко, А.В. Насипов, А.Л. Бондарь, Н.В. Самойлова // *Вестник науки и образования Северо-Запада России [Электронный ресурс]*. 2024. Т. 10. № 4. Шифр: ЭЛ № ФС77–63282. С. 6-17. Режим доступа: <http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2024/12/2024-N4-Ageev-et-al.pdf>.
20. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M., Piepiórka-Stepuk J., Giurgiulescu L., Janowicz M., Jakubowski M. Experimental characterization and mathematical modeling of fracture and friction resistance forces during tuna cutting // *Journal of Food Engineering*. 2021. Vol. 307. P. 110648.
21. Агеев О.В., Наумов В.А., Фатыхов Ю.А., Самойлова Н.В. Математическое моделирование силы сопротивления формы двухкромочного ножа без боковых граней при резании рыбы // *Известия КГТУ*. 2019. № 53. С. 75-88.
22. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov J.A. Mathematical modeling of the resistance force of the profile of a flat-back knife // *Journal of Friction and Wear*. 2019. Vol. 40. No. 6. P. 580-587.
23. Самойлова, Н.В. Математическое моделирование процесса резания рыбы ножом с фигурной криволинейной кромкой / Н.В. Самойлова, О.В. Агеев // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2023. Т. 9. № 3. Шифр: ЭЛ № ФС77–63282. С. 7-26.
24. Ageev O.V., Jakubowski M., Giurgiulescu L. Mathematical simulation of deformation friction force during food material cutting // *Carpathian Journal of Food Science and Technology*. 2020. Vol. 12 (4). P. 5-11.
25. Агеев, О.В. Математическое моделирование процесса разрушения волокон мышечной ткани при резании рыбы / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов // *Известия КГТУ*. 2021. № 60. С. 57-73.

REFERENCES

1. Boisly M., Schuldts S., Kaestner M.G., Schneider Y., Rohm H. Experimental

characterization and numerical modeling of cutting processes in viscoelastic solids. *Journal of Food Engineering*. 2016. No. 191, pp. 1-9.

2. Schuldt S., Schneider Y., Rohm H. High-speed cutting of foods: Cutting behavior and initial cutting forces. *Journal of Food Engineering*. 2018. No. 230. pp. 55-62.

3. Ageev O.V., Fatykhov Yu.A., Samojlova N.V. Matematicheskoe modelirovanie sil normal'nogo kontaktnogo davleniya na grani dvuhkromochnogo nozha pri rezanii ryby [Mathematical simulation of forces of normal contact pressure on the facets of double-edge knife during fish cutting] *Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2018. No. 50, pp. 81-102.

4. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A. Matematicheskoe modelirovanie sil poleznogo soprotivleniya pri rezanii okhlazhdennykh pishchevykh produktov [Mathematical simulation of effective resistance forces during cutting of chilled food products]. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2020. No. 3, pp. 70-82.

5. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A. Matematicheskoe modelirovanie sil normal'nogo kontaktnogo davleniya na bokovye grani nozha pri rezanii pishhevyykh materialov [Mathematical simulation of forces of normal contact pressure on side knife edges during cutting of food materials]. *Nauchnyy zhurnal Sankt-Peterburgskogo nacional'nogo issledovatel'skogo universiteta informacionnykh tekhnologiy, mehaniki i optiki. Seriya: Processy i apparaty pishhevyykh proizvodstv*. 2017. No. 4(34), pp. 27-42.

6. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov J.A. Mathematical modeling of the resistance force of the profile of a flat-back knife. *Journal of Friction and Wear*. 2019. Vol. 40, No. 6, pp. 580-587.

7. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A., Samoilova N.V. Podhod k raschetu deformatsionnoy sily treniya pri rezanii ohlazhdennoy ryby [Approach to computation of deformation friction force during chilled fish cutting]. *Journal International Academy of Refrigeration*. 2019. No. 4, pp. 49-56.

8. Lima D. A. S., Santos M. M. F., Sousa A. M. B. L., Bezerra T. K. A., da Silva Araujo H. B., Madruga M. S., da Silva F. A. P. The cutting by-product of fish filleting on the band saw machine: Nutritional quality and technological potential. *Waste Biomass Valorization*. 2022. No. 13(11), pp. 4575-4584.

9. Lima D. A. S., Santos M. M. F., Duvalé R. L. F., Bezerra T. K. A., Araujo I. B. D., Madruga M. S., da Silva F. A. P. Technological properties of protein hydrolysate from the cutting byproduct of serra Spanish mackerel (*Scomberomorus brasiliensis*). *Journal of Food Science and Technology-Mysore*. 2021. No. 58(8), pp. 2952-2962.

10. Azarmdel H., Mohtasebi S. S., Jafari A., Rosado Mucoz A. Developing an orientation and cutting point determination algorithm for a trout fish processing system using machine vision. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. No. 162, pp. 613-629.

11. Kapłonek W., Nadolny K., Zieliński B., Plichta J., Pimenov D. Y., Sharma S. The Role of Observation-Measurement Methods in the Surface Characterization of X39Cr13 Stainless-Steel Cutting Blades Used in the Fish Processing Industry. *Materials*. 2020. No. 13(24), pp. 5796.

12. Bar E., Mathiassen J. R., Eilertsen A., Mugaas T., Misimi E., Linnerud E. S., Salomonsen C., Westavik H. J. I. R. A. I. J. Towards robotic post-trimming of salmon fillets. *Industrial Robot: An International Journal*. 2016. No. 43(4), pp. 421-428.

13. Xu W., He Y., Li J., Zhou J., Xu E., Wang W., Liu D. Robotization and intelligent digital systems in the meat cutting industry: From the perspectives of robotic cutting, perception, and digital development. *Trends in Food Science & Technology*. 2023. No. 135, pp. 234-251.

14. Zhang X., Gong Z., Liang X., Sun W., Ma J., Wang H. Line Laser Scanning Combined with Machine Learning for Fish Head Cutting Position Identification. *Foods*. 2023. No. 12(24), pp. 4518.

15. Song S., Liu Z., Huang M., Zhu Q., Qin J., Kim M. S. Detection of fish bones in fillets by Raman hyperspectral imaging technology. *Journal of Food Engineering*. 2020. No. 272, pp. 109808.

16. Kasperowicz Maciej B., Chomka Grzegorz P., Bil Tadeusz. Determination of Supply Pressure during Cutting Fish Using High-Pressure Water Stream Taking into Account the Cutting Place and Diameter of the Water Nozzle. *International Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 16, No. 3, pp. 20180395.

17. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M., Piepiórka-Stepuk J., Samojlova N.V., Jakubowski M. Increasing the Efficiency of Food Materials Cutting during Inclined and Shear Movements of Knife. *Materials*. 2022. Vol. 15, P. 289.

18. Samojlova N.V. Sovershenstvovanie protsessa i oborudovaniya dlya portsonirovaniya ryby [Improving the process and equipment for fish portioning]. 2024. 282 p.

19. Ageev O.V., Peretyatko S.B., Nasipov A.V., Bondar A.L., Samojlova N.V. Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva diskovykh nozhei rybopererabatyvayushchikh mashin [Improvement of manufacturing technology for disc knives of fish processing machines]. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2024. Vol. 10, No. 4, pp. 6–17.

20. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M., Piepiórka-Stepuk J., Giurgiulescu L., Janowicz M., Jakubowski M. Experimental characterization and mathematical modeling of fracture and friction resistance forces during tuna cutting. *Journal of Food Engineering*. 2021. Vol. 307, pp. 110648.

21. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A., Samojlova N.V. Matematicheskoe modelirovanie sily soprotivleniya formy dvukhkromochnogo nozha bez bokovykh graney pri rezanii ryby [Mathematical simulation of profile resistance force of double-edged knife without side edges during fish cutting]. *Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, No. 53, pp. 75-88.

22. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov J.A. Mathematical modeling of the resistance force of the profile of a flat-back knife. *Journal of Friction and Wear*. 2019. Vol. 40. No. 6. P. 580-587.

23. Samojlova N.V., Ageev O.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessa rezaniya ryby nozhom s figurnoi krivolineinoi kromkoi [Mathematical simulation of fish cutting process by knife with a figured edge]. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2023. Vol. 9. No. 3. P. 7–26.

24. Ageev O.V., Jakubowski M., Giurgiulescu L. Mathematical simulation of deformation friction force during food material cutting. *Carpathian Journal of Food Science and Technology*. 2020. Vol. 12 (4). P. 5-11.

25. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A. Matematicheskoe modelirovanie protsessa razrusheniya volokon myshechnoy tkani pri rezanii ryby [Mathematical simulation of the process of muscle filaments fracture during fish cutting]. *Kaliningrad State Technical University News*. 2021. No. 60. P. 57-73.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Агеев Олег Вячеславович – доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: oleg.ageev@klgtu.ru)	Ageev Oleg Viatcheslavovich – Dr.Sci. (Eng.), Professor, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: oleg.ageev@klgtu.ru)

Статья поступила в редакцию 01.03.2025; одобрена после рецензирования 15.03.2025, принята к публикации 20.03.2025.

The article was submitted 01.03.2025; approved after reviewing 15.03.2025; accepted for publication 20.03.2025.

Научная статья
УДК 621.67:628.25

ДИСКРЕТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ВОДОПРОВОДА

В.А. Наумов^{1,*}

¹ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

* E-mail: van-old@mail.ru

Аннотация. Дискретный метод определения оптимального диаметра водопровода с учетом реальных характеристик выпускаемых полиэтиленовых труб (ПЭТ) и центробежных насосов (ЦН) разработан в статье. При этом не требуется дифференцировать непрерывные функции. Ряд размеров ПЭТ и рабочие характеристики выпускаемых вертикальных многосекционных ЦН были использованы. Наличие в технической документации зависимости затраченной мощности насосного агрегата (ЦН + электродвигатель) от расхода воды позволило исключить сомнительное условие постоянства КПД. Инвестиционные затраты были приведены к одному году с помощью коэффициента дисконтирования.

Ключевые слова: трубопровод; оптимальный диаметр; центробежный насос; полиэтиленовые трубы; стоимостные характеристики; дискретный метод.

Для цитирования: Наумов В.А. Дискретный метод определения оптимального диаметра водопровода // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2025. Т. 11. № 2. С. 31–41.

Original article

THE DISCRETE METHOD FOR DETERMINING THE WATER PIPE OPTIMAL DIAMETER

V.A. Naumov^{1,*}

¹ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

* E-mail: van-old@mail.ru

Abstract. The discrete method for determining the optimal diameter of a water pipe, taking into account the real characteristics of manufactured polyethylene pipes (PET) and centrifugal pumps (CP), is developed in the article. In this case, it is not necessary to differentiate continuous functions. The number of PET sizes and performance characteristics of the manufactured vertical multi-section CP were used. The presence in the technical documentation of the spent power dependence of the pumping unit (CP + electric motor) on the water flow made it possible to exclude the dubious condition of constant efficiency. Investment costs were reduced to one year using a discount factor.

Keywords: pipeline; optimal diameter; centrifugal pump; polyethylene pipes; cost characteristics; discrete method.

For citation: Naumov V.A. The discrete method for determining the water pipe optimal diameter. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11, No. 2, pp. 31–41.

Введение

Задачи определения оптимальных параметров при проектировании систем

водоснабжения относятся к актуальным научно-техническим проблемам. Одной из таких задач является расчет наиболее экономичного внутреннего диаметра трубопровода d . Впервые решение такой классической задачи было опубликовано Geneteaux [1]. Увеличение внутреннего диаметра трубопровода d , с одной стороны, приводит к росту затрат на его создание из-за повышения материалоемкости. С другой стороны, чем больше значение d , тем меньше гидравлические потери давления в трубопроводе, значит, ниже затраты на работу электродвигателя насоса. Капитальные затраты на водопровод определялись [1] по стоимости единицы длины трубы:

$$C_{pipe} = B d^{\alpha} (1 + \omega) L, \quad (1)$$

где B , α – эмпирические константы, поправка ω учитывает стоимость клапанов, фитингов и монтажа трубопровода.

Эксплуатационные расходы C_{exp} определялись [1] как произведение затрачиваемой мощности насосного агрегата N на время его работы T и на стоимость Квт час электроэнергии Z . Мощность, необходимая для перекачивания, определялась как произведение объемного расхода (подачи насоса) Q на падение давления ΔP , деленное на КПД насосного агрегата η . Коэффициент гидравлических потерь по длине λ в [1] был принят как у новых стальных труб при турбулентном течении (область сопротивления гидравлически гладких труб). Суммарные затраты, приведенные к одному году:

$$Cc(d) = F \cdot C_{pipe}(d) + C_{exp}(d), \quad (2)$$

где F – коэффициент, учитывающий амортизацию. Приравнивание производной функции $Cc(d)$ к нулю позволило найти диаметр d_0 , при котором эта функция имеет минимум. Идея [1] оказалась весьма плодотворной. Большое количество последующих публикаций использовали и развивали ее.

В современных исследованиях рассматриваются различные частные случаи, либо принимаются во внимание ранее не учитываемые факторы. Опубликовано много приложений метода [1] к расчету конкретных систем водоснабжения. Так в статье [2] рассмотрены 2 частных случая экономической оптимизации диаметра трубы при турбулентном течении: гидравлически гладкие и шероховатые трубы. Получены различные значения оптимального диаметра трубы для расхода 20 л/с: в шероховатых трубах – диаметр 155 мм, в гладких трубах – диаметр 147 мм. Были учтены гидравлические потери в местных сопротивлениях, но нет статического перепада давления. Подход [2] не годится, если необходимо поднять воду на определенную высоту.

При определении диаметра трубопровода в [3] был использован коэффициент дисконтирования или коэффициент возмещения капитала (КВК) F для расчета суммы платежа, который должен быть произведен в конце каждого периода « k », для возмещения текущей суммы в конце периода по заранее определенной процентной ставке « r » [3]. КВК рассчитывается следующим образом:

$$F = r \cdot (1 + r)^k / [(1 + r)^k - 1]. \quad (3)$$

Значительная часть статьи [3] посвящена анализу зависимости стоимости труб от их диаметра – поиску эмпирических констант B и α в формуле (1). Была изучена стоимость шести различных материалов труб (2 вида армированного бетона, оцинкованное железо, 3 вида поливинилхлорида) диаметром 40, 50, 75, 90, 110 и 160 мм. Показатель степени α получился от 0.61 до 1.53. На части приведенных графиков наблюдается малое число точек и большой их разброс (например, PVC Grey Plain). Скорее всего, причина такого разброса в том, что авторы [3] использовали прайс-листы различных розничных магазинов. Поэтому

возникает сомнение в репрезентативности выборки. Решение поставленной математической задачи в [3] отсутствует. В дальнейшем использование метода Genereaux вместе с (3) для определения экономического диаметра трубопровода назвали Life-Cycle Cost Analysis (LCCA).

Исследование [4] посвящено сравнению расчетов при различных режимах течения: ламинарном, переходном и турбулентном. Они были реализованы с помощью сред разной вязкости. Объемный расход Q был довольно большой, соответственно, 0,111, 0,167 и 1.667 м³/с. Длина трубопровода во всех случаях была одинаковой $L=4000$ м. Использованы такие стоимостные характеристики: размер амортизационных отчислений за 1 м длины трубопровода и 1 м диаметра в год принят 18 руб., тариф на электроэнергию – 3 руб. за кВт·час. Рассчитанные оптимальные диаметры труб 31,1 39,2 и 41,9 мм. Один из выводов [4]: при увеличении вязкости перекачиваемой жидкости очень сильно возрастают затраты на электроэнергию.

Метод LCCA был использован в [5] для расчета оптимального диаметра трубопроводной сети на ферме, расположенной в регионе Ансеба в Эритрее (Anseba region of Eritrea). Выполнено сравнение результатов расчета d_0 по LCCA с результатами расчета по 11 приближенным формулам разных авторов. Это сравнение было основано на расчетных общих потерях напора и экономическом анализе диаметров труб рассматриваемой сети. Авторы [5] утверждают, что формула Bresse оказалась наиболее адекватной по сравнению с моделью LCCA.

В перечисленных работах не учитывается, что с уменьшением диаметра и увеличением гидравлических потерь потребуется насос большей мощности. Значит, стоимость устанавливаемого насоса непосредственно зависит от диаметра. Причем эта зависимость обратная. В [4] было отмечено, что потребная мощность зависит от диаметра. В частности, необходимая мощность насоса зависит обратно пропорционально d^5 для развитого турбулентного течения в трубопроводе. Однако этот факт не был учтен в затратах.

В [6] было предложено в инвестиционных расходах учитывать не только зависимость стоимости трубопровода от диаметра, но и насосной станции от потребной мощности:

$$C_{pump} = F N p_0, \quad (4)$$

где p_0 – стоимость одного установленного кВт насоса при его фактической мощности N . N было предложено рассчитывать как гидравлическую мощность, деленную на КПД (КПД принята постоянной $\eta=0,77$). Работа [6] имеет существенные недостатки. Фиксирует скорость движения воды по трубам (0,8 м/с), а не расход. Приведенные примеры не доведены до решения. Анализируется только зависимость (1). Зависимость p_0 от d в формуле (4) не определена. Оптимальные диаметры не были найдены.

Похожий подход был использован в [7]. Было замечено, что стоимость трубопровода из полиэтилена прямо пропорциональна его массе. Масса 1 м рассчитывалась по формуле:

$$m_1 = \pi \cdot d^2 \cdot \rho_{PE} \cdot (SDR - 1) / SDR^2, \quad (5)$$

где SDR – отношением внутреннего диаметра трубы d к толщине ее стенки s , ρ_{PE} – плотность полиэтилена. Важно, что пластиковые трубы подбирают из линейки с одинаковой способностью выдержать заданной давление PN . А величина PN у труб и определяет значение SDR . Была выдвинута гипотеза о форме связи между диаметром трубопровода и мощностью насосной станции [7]:

$$d^2 = \xi_1 \ln(N) + \xi_0, \quad (6)$$

где ξ_0 , ξ_1 – константы зависимости средневзвешенного диаметра трубопроводной сети от мощности насосной станции. Они должны подбираться при обработке результатов

гидравлического моделирования для каждой водопроводной сети. Конкретных примеров в [7] не приведено, решение поставленной в статье задачи отсутствует.

Подход [6] был доведен до логического завершения в [8, 9], где было получено, что зависимость стоимости насосов от их мощности близка к линейной функции. Было установлено по прайс-листам, что стоимость единицы длины трубы прямо пропорциональна ее объему: $C_{pipe} = B \cdot v$. Однако формула для объема трубы v в [8] содержит ошибку. Поэтому результаты расчетов [8] не могут быть признаны достоверными.

Известно, что затраченную мощность электронасосного агрегата N можно найти делением гидравлической мощности N_G на КПД η :

$$N = N_G / \eta, N_G = \rho g Q H, \eta = \eta_P \eta_E, \quad (7)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; H – напор насоса, м; η_P – КПД насоса, η_E – КПД электродвигателя.

Формула (7) используется во всех перечисленных статьях. Общим недостатком этих статей является допущение, что КПД можно считать постоянным ($\eta = \text{const}$). В действительности, КПД зависит от конструкции и мощности насоса. У конкретного насоса КПД является функцией подачи.

В [10] был предложен метод расчета оптимального диаметра магистрального трубопровода с использованием рабочих характеристик насоса. Это позволило учесть изменение КПД при переходе к другому диаметру трубопровода. Кроме того, в статье [11] было показано, что массу и стоимость ПЭТ труб следует рассчитывать не по (5), а по следующей формуле (m – масса одного метра ПЭТ, c_1 – стоимость одного кг ПЭТ):

$$C_{pipe} = m \cdot c_1 \cdot L, m = 0,25 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot L [SDR^2 / (SDR - 2)^2 - 1] \cdot \rho_{PE}, \quad (8)$$

Недостатком предыдущих работ, в том числе и [10, 11], является допущение, что диаметр трубы и номинальная мощность центробежного насоса являются непрерывными аргументами, а функции от них можно дифференцировать. В действительности, ряд диаметров водопроводных труб, выпускаемых как в России, так и в других странах, является дискретным. Он задается в соответствующих нормативных документах. Для российских ПЭТ труб это ГОСТ¹. Массив мощностей центробежных насосов, предлагаемых на рынке, также является дискретным и ограниченным.

Цель данной статьи – разработка дискретного метода определения оптимального диаметра ПЭТ водопровода с учетом реальных характеристик выпускаемых труб и центробежных насосов.

Материалы и методы

В табл. 1 представлен ряд ПЭТ в соответствии с ГОСТом¹ и рассчитанные значения внутренних диаметров $d = D - 2s$, где D – номинальный внешний диаметр, s – номинальная толщина стенки трубы.

Таблица 1 – Диаметры и толщина стенок ПЭТ-100 по ГОСТу¹

D, мм	Максимальное рабочее давление, МПа							
	0,6 (SDR=26)		0,8 (SDR=21)		1,0 (SDR=17)		1,25 (SDR=13,6)	
	s, мм	d, мм	s, мм	d, мм	s, мм	d, мм	s, мм	d, мм
75	2.9	69,2	3.6	67,8	4.5	66,0	5.6	63,8
90	3.5	83,0	4.3	81,4	5.4	79,3	6.7	76,6

¹ ГОСТ 18599-2001. Трубы напорные из полиэтилена. Технические условия. Издание официальное. Москва: Издательство стандартов, 2003. 45 с.

110	4.2	101,6	5.3	99,4	6.6	96,8	8.1	93,8
125	4.8	115,4	6.0	113,0	7.4	110,2	9.2	106,6
140	5.4	129,2	6.7	126,6	8.3	123,4	10.3	119,4
160	6.2	147,6	7.7	144,6	9.5	141,0	11.8	136,4
180	6.9	166,2	8.6	162,8	10.7	158,6	13.3	153,4
200	7.7	184,6	9.6	180,8	11.9	176,2	14.7	170,6
225	8.6	207,8	10.8	203,4	13.4	198,2	16.6	191,8
250	9.6	230,8	11.9	226,2	14.8	220,4	18.4	213,2

Производители напорных ПЭТ для сетей водоснабжения, как правило, размещают прайс-листы в открытом доступе. Здесь воспользуемся данными из прайс-листа от 01.08.2024². По рис. 1 видно, что стоимость одного метра ПЭТ CT_1 , практически, прямо пропорциональна массе одного метра ПЭТ m :

$$CT_1 = c_1 \cdot m. \quad (9)$$

где $c_1 = 0,439$ тыс. руб./кг – стоимость одного кг ПЭТ. Тогда стоимость ПЭТ можем рассчитывать по формуле (9).

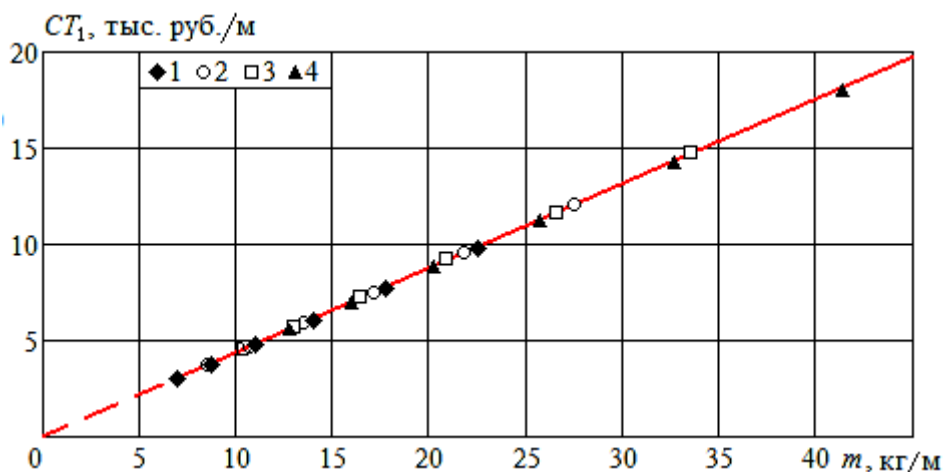


Рисунок 1 – Зависимость стоимости ПЭТ от массы. Точки – данные прайс-листа²:

1 – $PN = 0,6$ МПа; 2 – $PN = 0,8$ МПа; 3 – $PN = 1,0$ МПа; 4 – $PN = 1,25$ МПа;

линия – результат расчета по формуле (9)

В настоящее время многие производители насосов включают в техническую документацию не только зависимость затраченной мощности насоса N_p (обозначение в англоязычной технической документации P_2) от Q , но и зависимость затраченной мощности электродвигателя $N = N_p / \eta_E$ (P_1). Это позволяет усовершенствовать метод расчета, предложенный в [11]. В данной статье воспользуемся данными каталога компании Grundfos вертикальных многоступенчатых центробежных насосов серии CR³. Их рабочие характеристики необходимо аппроксимировать аналитическими зависимостями с помощью ранее разработанного метода [12-14].

Характеристику трубопровода запишем так:

² ООО «Группа Полипластик». Напорные ПЭТ для сетей водоснабжения. URL: <https://www.polyplastic.ru/upload/price/price-napor.pdf> (дата обращения 25.10.2024).

³ Grundfos Company. Vertical multistage centrifugal pumps CR. URL: <https://product-selection.grundfos.com/products/cr-cre-cri-crie-crn-crne-crte/cr?tab=models> (date: 15.07.2024).

$$f(d, Q) = H_C + f_1(d, Q), \quad f_1(d, Q) \approx 8,8 \cdot \lambda \cdot L \cdot Q^2 / (\pi^2 d^5 g), \quad (10)$$

где H_C – статический напор, м; L – длина трубопровода, м; λ – коэффициент гидравлических потерь на трение по длине трубопровода (КГП) увеличен на 10%, чтобы приближенно учесть потери напора в местных сопротивлениях.

Одна из особенностей расчета – определение КГП ПЭТ. В российских нормативных документах⁴ для расчета КГП по длине пластмассовых труб рекомендована формула, которую после упрощения можно записать, как в [11]:

$$\lambda = \left(\frac{0,25 \cdot b}{\lg(3,7/\delta)} + \frac{0,656 \cdot (2-b)}{\lg Re - 1} \right)^2, \quad b = 1 + \frac{\lg Re}{\lg Re_{\text{кв}}}, \quad Re = \frac{V \cdot d}{\nu}, \quad (11)$$

где b – число подобия режимов течения (при $b > 2$ следует принимать $b = 2$); $Re = Vd/\nu$ – текущее число Рейнольдса; V – скорость воды, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости воды, м²/с; $\delta = \Delta/d$ – относительная шероховатость ПЭТ; Δ – абсолютная эквивалентная шероховатость ПЭТ; $Re_{\text{кв}} = 500/\delta$ – число Рейнольдса начала квадратичной (автомодельной) области гидравлического сопротивления. В [11] было показано, что относительную шероховатость малых и средних ПЭТ можно считать $\delta \approx 8,09 \cdot 10^{-5}$.

Диаметр трубопровода, при котором будет обеспечен расход воды Q_0 , находим для каждого j -го насоса следующим образом. Сначала рассчитываем предварительное значение диаметра d_x в рабочей точке насосной установки (РТНУ) по уравнению:

$$f(d_x, Q_0) = \varphi_j(Q_0). \quad (12)$$

Затем рассчитываем напор насоса в РТНУ $f(d_x, Q_0)$ и определяем предельное давление PN . Далее выбираем из столбца табл. 1 (для найденного PN) значение d_j , ближайшее к d_x .

Часть эксплуатационных затрат, косвенно зависящих от диаметра трубопровода, будем рассчитывать непосредственно по затраченной мощности электродвигателя N :

$$C_{\text{exp}} = z \cdot A_E = z \cdot N \cdot T, \quad T = T_0 K, \quad (13)$$

где z – стоимость электроэнергии (тыс. руб./кВт·час.); A_E – работа (кВт·час.), затраченная электродвигателем насоса за время T (час.); K – количество дней в году; T_0 – продолжительность работы насоса в сутки.

Тарифы на электроэнергию различаются по регионам России и растут из года в год. По данным Интернет-ресурса⁵ в Калининградской области тариф на электроэнергию для потребителей с максимальной мощностью энергообъектов предприятия менее 670 кВт, подключенных к сетям по низкому уровню напряжения (0,4 кВ) в августе 2024 года составил $z = 10,6895 \cdot 10^{-3}$ тыс. руб./кВт·час (АО «Янтарьэнергообл»).

Суммарные затраты, приведенные к одному году для j -го насоса с соответствующим ему диаметром трубопровода d_j и массой m_j рассчитываем по формуле:

$$C_{Cj} = F \cdot (m_j c_1 \cdot L + CP_j) + z \cdot N_j \cdot T_0 \cdot K, \quad (13)$$

⁴Свод правил СП 399.1325800.2018 Системы наружного водоснабжения и водоотведения из полимерных материалов. Правила проектирования и монтажа. Издание официальное. Москва: Стандартинформ, 2019. 90 с.

⁵ TIME2SAVE. Тарифы на электроэнергию. URL: <https://time2save.ru/tarify-na-elektroenergiu-dla-malih-predpriyatiy-i-ip> (дата обращения: 12.12.2024).

В формуле (13), величина F рассчитывается по (3), m_j – по (8). Далее останется только выбрать наименьшее значение Cs_j из полученного массива.

Результаты расчета и обсуждение

Расчет выполним для магистральной трубы водопровода длиной $L=800$ м, $H_C = 28$ м (включает необходимый свободный напор), $Q_0 = 7,5$ л/с = 27 м³/час. Такую подачу обеспечивают вертикальные многоступенчатые центробежные насосы линейки CR32³. Напор такого насоса определяется количеством ступеней. Модель CR32-2 имеет 2 ступени, модель CR32-2-1 – также 2 ступени, но одна из них – уменьшенного диаметра. Поэтому на рис. 2 и 3 линия соответствующей характеристики 1 проходит выше, чем линия 2.

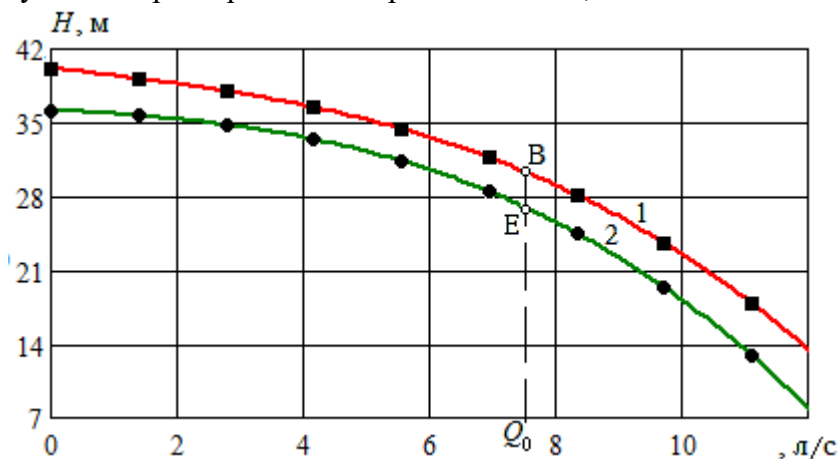


Рисунок 2 – Нагрузочная характеристика насосов: 1 – CR32-2, 2 – CR32-2-1.

Точки – данные заводских испытаний, линии – кубическая аппроксимация

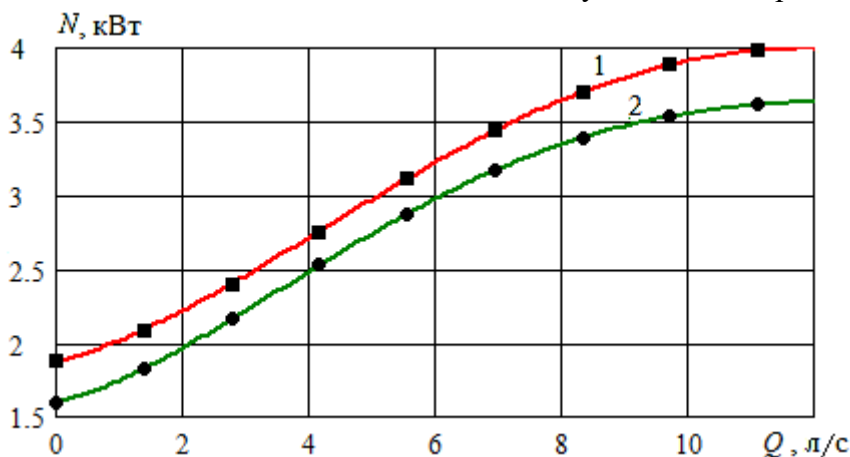


Рисунок 3 – Энергетическая характеристика насосных агрегатов.

Обозначения, как на рис. 2

На рис. 2 при $Q=Q_0$ напор у насоса CR32-2 (точка B) $H = 30,7$ м $> H_C$, а у CR32-2-1 – (точка E) $H = 27,4$ м $< H_C$. Следовательно, насос CR32-2-1 не может быть использован в рассматриваемых условиях. Далее, кроме CR32-2, рассмотрим возможность использования моделей CR32-3-3 и CR32-4-4.

Предварительное значение диаметра d_x в РТНУ, найденное численным методом по уравнению (12), представлено в табл. 2. Отмечаем, что напор в РТНУ заметно меньше 60 м, поэтому можно использовать ПЭТ PN6. В табл. 1 находим ближайшие значения внутреннего диаметра ПЭТ PN6 d_i и заносим их в табл. 1 вместе с соответствующим наружным диаметром D . Далее пересчитываем уточненное значение подачи Q_1 при стандартных значениях d_i . Так как d_i чуть больше d_x , расход Q_1 получился незначительно выше Q_0 .

Таблица 2 – Значения параметров в РТНУ

Насос	d_x , мм	d_i , мм	D , мм	Q_1 , л/с	H , м	N , кВт
CR32-2	127,2	129,2	140	7,56	30,3	3,564
CR32-3-3	100,6	101,6	110	7,56	35,3	4,489
CR32-4-4	82,7	83,0	90	7,53	47,2	5,978

На. рис. 4 представлена графическая интерпретация определения РТНУ для трех центробежных насосов из серии CR32.

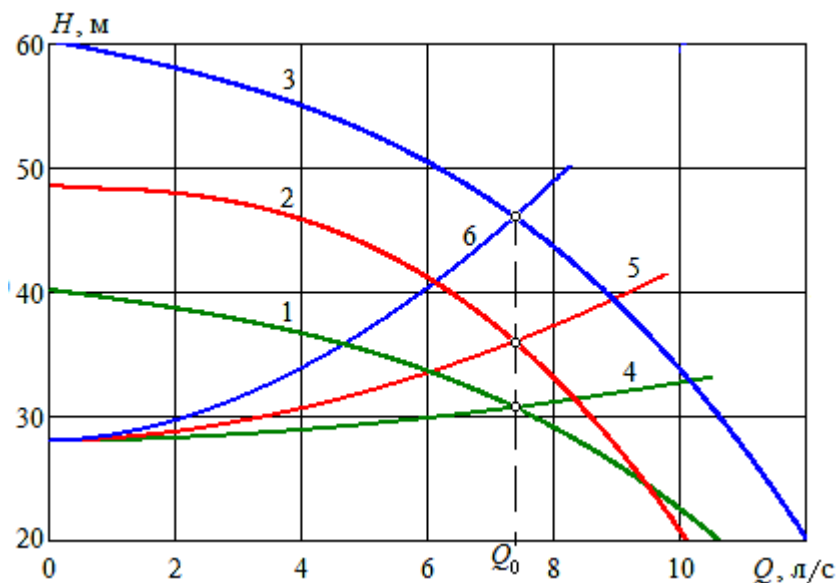


Рисунок 4 – Определение рабочей точки насосной установки:

- 1, 2, 3 – нагрузочные характеристики CR32-2, CR32-3-3, CR32-4-4, соответственно;
4, 5, 6 – характеристики трубопровода при $D=140$, 110 и 90 мм, соответственно

В табл. 3 и 4 представлены рассчитанные стоимостные характеристики, с инвестиционными затратами, приведенные к одному году с помощью коэффициента F . В обоих случаях время жизни проекта принято $k = 20$ лет. Первые два столбца не поменялись. Но в табл. 3 $T_0 = 18$ час, $r = 0,12$, а в табл. 4 $T_0 = 12$ час, $r = 0,08$. Поэтому приведенные инвестиционные затраты и эксплуатационные затраты изменились.

Таблица 3 – Результаты расчета приведенной стоимости ($T_0 = 18$ час, $r=0,12$), тыс. руб.

Насос	CP	C_{pipe}	$F \cdot (C_{pipe} + CP)$	C_{exp}	C_c
CR32-2	348,516	764,196	148,969	250,300	399,269
CR32-3-3	440,149	472,571	122,194	315,279	437,473
CR32-4-4	540,388	315,381	114,569	419,861	534,431

Таблица 4 – Результаты расчета приведенной стоимости ($T_0 = 12$ час, $r=0,08$), тыс. руб.

Насос	CP	C_{pipe}	$F \cdot (C_{pipe} + CP)$	C_{exp}	C_c
CR32-2	348,516	764,196	113,332	166,867	280,199
CR32-3-3	440,149	472,571	92,963	210,186	303,149
CR32-4-4	540,388	315,381	87,162	279,908	367,070

По табл. 3 и 4 видно, что наименьшие приведенные затраты (последний столбец) получаются при использовании CR32-2 и трубопровода с диаметром $D = 140$ мм.

Заключение

Таким образом, разработан дискретный метод определения оптимального диаметра водопровода с учетом характеристик соответствующего центробежного насоса. Основными этапами метода являются:

1. Формирование массива внутренних диаметров ПЭТ-100 по ГОСТу¹ в зависимости от предельного давления PN ; определение стоимости трубопровода в зависимости от диаметра и SDR по действующим прайс-листам.
2. Выбор по нагрузочным характеристикам линейки центробежных насосов, у которых при $Q=Q_0$ напор $H>H_C$; определение их стоимости по действующим прайс-листам.
3. Определение численным методом по уравнению (12) предварительных значений диаметра d_x в РТНУ. Отбор ПЭТ с внутренним диаметром d_i большим d_x . Перерасчет Q_1 по стандартным диаметрам d_i .
4. Расчет суммарных годовых затрат с инвестиционными затратами, приведенными к одному году с помощью коэффициента F .
5. Выбор диаметра трубопровода и соответствующего ему центробежного насоса с наименьшими приведенными затратами.

Расчет с помощью дискретного метода показал, как правило, наименьшие приведенные затраты обеспечивает первый из насосов линейки (и трубопровод с соответствующим диаметром), у которого при $Q=Q_0$ напор $H>H_C$.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Genereaux R.P. Fluid-flow design methods // Industrial Engineering Chemistry. 1937. Vol. 29, No.4, pp. 385-388.
2. Genic S., Jacimovic B., Gení V. Economic optimization of pipe diameter for complete turbulence // Energy and Buildings. 2012. Vol. 45, pp. 335-338.
3. Sonowal A., Senapati S.C., Adamala S. A mathematical model for the selection of an economical pipe size in pressurized irrigation systems // African Journal of Agricultural Research. 2016. Vol. 11, No.8, pp. 683-692.
4. Оптимизация технологических параметров и диаметра трубопровода с учетом энерго- и ресурсосбережения / А.Б. Голованчиков, Т.А. Дулькин, Н.А. Прохоренко, Н.А. Меренцов // Вестник ТГТУ. 2020. Т. 26, № 1. С. 91-99.
5. Comparison and validation of models for the design of optimal economic pipe diameters: A case study in the Anseba Region, Eritrea / Arumugam A., Subramani S., Kibrom H. et al. // TecnoLógicas. 2021. Vol. 24(52). DOI: 10.22430/22565337.
6. Bedjaoui A., Achour B., Bouziane M.T. Nouvelle approche pour le calcul du diametre economique dans les conduites de refoulement. Courrier du Savoir scientifique et technique. 2005. Vol. 6, No.6, pp. 141-145.
7. Об оптимизации проектных решений по оросительным системам на основе анализа инвестиционных и операционных затрат / И.В. Корнеев, А.С. Балабаев, А.Н. Данильченко, С.А. Максимов // Природообустройство. 2018. № 1. С. 94-98.
8. Pang-Ngam M., Soponpongpiat N. On the optimum pipe diameter of water pumping system by using engineering economic approach in case of being the Installer for consuming water // Journal of Science and Technology Mahasarakham University. 2012. Vol. 31, No.5, pp. 618-624.
9. Sakr M.R., Gooda E.A. Economical velocity through pipeline networks. Case studies of several different markets // Alexandria Engineering Journal. 2018. Vol. 57, pp. 2999-3007.
10. Наумов В.А. Определение оптимального диаметра трубопровода локальной системы водоснабжения с учетом нагрузочных характеристик и затрат на центробежный насос // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 2(47). С. 153-160.

11. Наумов В.А., Шторк А.В. Особенности определения оптимального диаметра при проектировании систем водоснабжения с полиэтиленовыми трубами // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 4(57). С. 176-183.
12. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Методика выбора центробежных скважинных насосов типа ЭЦВ // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2017. № 1 (39). С. 18-21.
13. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Примаков Л.В. Обобщенные характеристики канализационных насосов высокой производительности // Механизация строительства. 2017. Т. 78, № 10. С. 32-36.
14. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Энергетическая эффективность гидравлической системы с центробежным насосом // Известия вузов. Машиностроение. 2024. № 10(775). С. 54-60.

REFERENCES

1. Genereaux R.P. Fluid-flow design methods. Industrial Engineering Chemistry. 1937. Vol. 29, No.4, pp. 385-388.
2. Genic S., Jacimovic B., Gení V. Economic optimization of pipe diameter for complete turbulence. Energy and Buildings. 2012. Vol. 45, pp. 335-338.
3. Sonowal A., Senapati S.C., Adamala S. A mathematical model for the selection of an economical pipe size in pressurized irrigation systems. African Journal of Agricultural Research. 2016. Vol. 11, No.8, pp. 683-692.
4. *Optimizaciya tekhnologicheskikh parametrov i diametra truboprovoda s uchetom energo- i resursosberezheniya* [Optimization of technological parameters and pipeline diameter taking into account energy and resource saving]. A.B. Golovanchikov, T.A. Dul'kin, N.A. Prohorenko, N.A. Merencov. *Vestnik TGTU*. 2020. Vol. 26, No. 1, pp. 91-99.
5. Comparison and validation of models for the design of optimal economic pipe diameters: A case study in the Anseba Region, Eritrea / Arumugam A., Subramani S., Kibrom H. *et al. TecnoLógicas*. 2021. Vol. 24(52). DOI: 10.22430/22565337.
6. Bedjaoui A., Achour B., Bouziane M.T. Nouvelle approche pour le calcul du diametre economique dans les conduites de refoulement. *Courrier du Savoir scientifique et technique*. 2005. Vol. 6, No.6, pp. 141-145.
7. *Ob optimizacii proektnykh reshenij po orositel'nykh sistemam na osnove analiza investitsionnykh i operatsionnykh zatrat* [On optimization of design solutions for irrigation systems based on analysis of investment and operating costs]. I.V. Korneev, A.S. Balabaev, A.N. Danil'chenko, S.A. Maksimov. *Prirodoobustrojstvo*. 2018. No. 1, pp. 94-98.
8. Pang-Ngam M., Soponpongpiat N. On the optimum pipe diameter of water pumping system by using engineering economic approach in case of being the Installer for consuming water. *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*. 2012. Vol. 31, No.5, pp. 618-624.
9. Sakr M.R., Gooda E.A. Economical velocity through pipeline networks. Case studies of several different markets. *Alexandria Engineering Journal*. 2018. Vol. 57, pp. 2999-3007.
10. Naumov V.A. *Opreделение optimal'nogo diametra truboprovoda lokal'noj sistemy vodosnabzheniya s uchetom nagruzochnykh harakteristik i zatrat na centrobezhnyj nasos* [Determination of the optimal diameter of the pipeline of a local water supply system, taking into account the load characteristics and costs of a centrifugal pump]. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo*. 2022. No. 2(47), pp. 153-160.
11. Naumov V.A., Shtork A.V. *Osobennosti opredeleniya optimal'nogo diametra pri proektirovanii sistem vodosnabzheniya s polietilenovymi trubami* [Features of determining the optimal diameter in the design of water supply systems with polyethylene pipes]. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo*. 2023. No. 4(57), pp. 176-183.

12. Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I. *Metodika vybora centrobezhnyh skvazhinnyh nasosov tipa ECV* [The method of choosing centrifugal borehole pumps of the ECV type]. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa*. 2017. No. 1 (39), pp. 18-21.
13. Velikanov N.L., Naumov V.A., Primak L.V. *Obobshchennye harakteristiki kanalizacionnyh nasosov vysokoj proizvoditel'nosti* [Generalized characteristics of high-performance sewage pumps]. *Mekhanizaciya stroitel'stva*. 2017. Vol. 78, No. 10, pp. 32-36.
14. Velikanov N.L., Naumov V.A. *Energeticheskaya effektivnost' gidravlicheskoj sistemy s centrobezhnym nasosom* [Energy efficiency of a hydraulic system with a centrifugal pump]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroenie*. 2024. No. 10(775), pp. 54-60.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Наумов Владимир Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т 1, e-mail: van-old@mail.ru)	Naumov Vladimir Arkad'evich – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: van-old@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 02.03.2025; одобрена после рецензирования 16.03.2025, принята к публикации 15.04.2025.

The article was submitted 02.03.2025; approved after reviewing 16.03.2025; accepted for publication 15.04.2025.



Научная статья
УДК 626.8:691.322

БЕТОНЫ С МЕЛКИМ МЕСТНЫМ ПЕСКОМ ДЛЯ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

В.М. Федоров¹, Е.В. Васильева^{2,*}

¹ Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова, ФГБОУ ВО «Донской государственный аграрный университет», г. Новочеркасск, Россия

² Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

* E-mail: karalenka5@yandex.ru

Аннотация. В статье предложены бетоны с использованием мелких местных песков для сооружений гидромелиоративных систем. Доля мелких и очень мелких песков в некоторых регионах страны достигает 90 - 95% от общих запасов. Применение их в бетонах без специального обогащения вызывает перерасход цемента на 15-20%. Если в обычных бетонах перерасход цемента, обусловленный некондиционностью заполнителей, в основном снижает его экономические показатели, то в гидротехническом бетоне это влечет за собой еще и снижение долговечности сооружений. Ведь избыток цемента в гидротехническом бетоне вреден, так как ведет к термическому трещинообразованию и увеличению усадки. Благодаря добавлению в смесь формиатно-спиртового разжижителя удалось получить высокоподвижные бетонные смеси, содержащие мелкие пески и, на этой основе, без перерасхода цемента, добиться повышения прочностных и эксплуатационных качеств бетона.

Ключевые слова: *мелкие местные пески; некондиционные заполнители; щебень; пылевидные и глинистые примеси; формиатно-спиртовой разжижитель; бетонная смесь; строительно-технические и технологические свойства; крупный и мелкий заполнители; планирование эксперимента; математическая модель; уравнение регрессии; прочность.*

Для цитирования: Федоров В.М., Васильева Е.В. Бетоны с мелким местным песком для гидромелиоративного строительства // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2025. Т. 11, № 2. С. 42-53.

Original article

CONCRETE WITH FINE LOCAL SAND FOR WATER RECLAMATION CONSTRUCTION

V.M. Fedorov¹, E.V. Vasilyeva^{2,*}

¹ Novocherkassk Engineering and Reclamation Institute named after A.K. Kortunov, Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russia

² South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russia

* E-mail: karalenka5@yandex.ru

Abstract. The article proposes concretes using fine local sands for the construction of irrigation and drainage systems. The share of fine and very fine sands in some regions of the country reaches 90-95% of the total reserves. Their use in concretes without special enrichment causes an excess of cement consumption by 15-20%. If in ordinary concretes the excess of cement, caused by the substandard fillers, mainly reduces its economic indicators, then in hydraulic concrete

this also entails a decrease in the durability of structures. After all, excess cement in hydraulic concrete is harmful, since it leads to thermal cracking and increased shrinkage. Due to the addition of a formate-alcohol thinner to the mixture, it was possible to obtain highly mobile concrete mixtures containing fine sands and, on this basis, without excess cement consumption, achieve an increase in the strength and performance properties of concrete.

Keywords: *fine local sand; substandard aggregates; crushed stone; dust and clay impurities; formate-alcohol thinner; concrete mix; construction and technological properties; coarse and fine aggregates; experimental design; mathematical model; regression equation; strength.*

For citation: Fedorov V.M., Vasilyeva E.V., Concretes with fine local sand for irrigation and drainage construction // *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11, No. 2, pp. 42-53.

Введение

Стоимость заполнителей для бетона составляет в среднем около половины стоимости бетона, включая затраты на его изготовление. Применение доступных и дешевых местных заполнителей позволит снизить стоимость строительства, уменьшить объем транспортных перевозок, сократить сроки строительства.

Среди общих геологических запасов природного песка на территории России преобладают месторождения мелких и очень мелких песков [1-5]. Добывают их в основном в карьерах, отличаются они чрезмерным содержанием глинистых и других примесей, вызывающих перерасход цемента, замедление процессов твердения и снижение прочности бетона. Получение качественного бетона с высокими показателями плотности, прочности и долговечности, при использовании в нем мелких (или очень мелких) некондиционных песков, обеспечивается заполнением пустот между зернами песка цементным тестом и созданием между ними цементной прослойки. Объем цемента на создание такой прослойки зависит от общей площади поверхности зерен и возрастает с ее повышением и уменьшением модуля крупности песка. Доля песков с модулем крупности 1,0-1,5, не рекомендуемых без специального обогащения для применения в бетонах и растворах, достигает в некоторых регионах 90 - 95% от общих запасов [3, 6, 7].

При таких обстоятельствах приходится либо доставлять крупнозернистые пески из других регионов страны, что увеличивает нагрузку на транспортные магистрали и удорожает стоимость бетона, а следовательно строительных работ и строительства в целом, либо использовать местные мелкие некондиционные пески, что приводит к перерасходу цемента на 15 - 20%.

Из опыта ведущих зарубежных стран (США, Китай, ФРГ, Великобритании и др.) известно, что одним из условий получения прочного и долговечного бетона, без перерасхода цемента, является использование песков, промытых и фракционированных в специальных гидравлических классификаторах [8-10].

К сожалению, в нашей стране по ряду причин обогащение мелких некондиционных заполнителей почти не применяется, а крайне низкое качество используемых мелких местных (региональных) песков, как правило, компенсируется повышенным расходом (перерасходом) цемента.

Вместе с тем, если в обычных бетонах перерасход цемента, обусловленный некондиционностью заполнителей, в основном снижает его экономические показатели, то в гидротехническом бетоне это влечет за собой еще и снижение долговечности сооружений.

Экономию цемента в гидротехническом бетоне можно рассматривать как меру повышения его долговечности, принимая во внимание тот факт, что избыток цемента в гидротехническом бетоне вреден, так как ведет к термическому трещинообразованию и увеличению усадки [8-13].

В связи с вышеизложенным, представляют большой практический интерес научные разработки, направленные на снижение расхода цемента в бетонах, приготовленных с использованием некондиционных местных мелких песков. Обобщая имеющийся в этом отношении отечественный и зарубежный опыт, можно выделить несколько эффективных и перспективных направлений повышения качества бетона и снижения расхода цемента в нем при использовании некондиционных мелких песков.

Техническая целесообразность улучшения гранулометрического состава мелких песков путем смешивания их в требуемых пропорциях с укрупняющими добавками типа крупнозернистого песка, отсевов камнедробления, песчаных фракций шлаковых или других промышленных отходов и т.п., не вызывает сомнений, так как вполне очевидна. Границы применения такого способа обогащения некондиционных мелких песков определяются только наличием местных укрупняющих добавок и расчетами экономических показателей данного технического приема для каждого конкретного случая [8,10-13].

Вопросы же применения тех или иных химических добавок для повышения эффективности использования местных мелких некондиционных песков в бетонах не столь очевидны и требуют более подробного рассмотрения, что и нашло отражения в нижеприведенном исследовании.

Цель работы: Обосновать целесообразность применения мелких местных некондиционных песков для бетонов сооружений гидромелиоративных систем, установить влияние рецептурных факторов на расход цемента, прочностные и эксплуатационные качества бетона с выявлением эффективности формиатно-спиртового разжижителя.

Задачи исследования. Раскрыть смысл использования мелких местных некондиционных песков для бетонов сооружений гидромелиоративных систем, предложить высокоэффективный разжижитель на основе крупнотоннажного промышленного отхода для компенсации отрицательного влияния мелкого местного песка с загрязняющими примесями на качество бетона, изучить основные закономерности бетона на некондиционных заполнителях «состав-разжижитель-свойства».

Методика и результаты испытаний

В исследовании на примере крупного заполнителя - щебня из карбонатных пород Жирновского месторождения и мелкого местного заполнителя – песка Грушевского месторождения на территории Ростовской области, показана не только принципиальная возможность, но и достаточно высокая эффективность применения мелких региональных некондиционных песков в составе тяжелого бетона, благодаря использованию в составе бетонной смеси побочного продукта производства спирта-пентаэритрита, в виде формиатно-спиртового компонента (разжижителя ФСР), представляющего собой водный раствор 50%-ной концентрации из формиата натрия, сиропообразующих веществ и полиспиртов,

Для проведения экспериментальных исследований использовались следующие материалы:

1. Цемент М 500 Новороссийского завода «Октябрь».
2. Крупный заполнитель – щебень фракции 5-20 мм из карбонатных пород Жирновского месторождения с содержанием пылевидных и глинистых частиц свыше 2%, прочностью, определяемой сдавливанием в цилиндре М 800, морозостойкостью F 50, пустотностью 45% .
3. Мелкий заполнитель – песок Грушевского месторождения с модулем крупности $M_{кр} = 1,48$, с содержанием пылевидных и глинистых частиц свыше 7%, пустотностью свыше 45%, насыпной плотностью 1,42 т/м³.

4. Добавка - побочный продукт производства спирта-пентаэритрита в виде формиатно-спиртового компонента (разжижителя ФСР), представляющего собой водный раствор 50%-ной концентрации из формиата натрия, сиропообразующих веществ и полиспиртов.

В таблице 1 приведены результаты испытаний стандартных бетонных образцов, изготовленных с использованием перечисленных материалов, но без добавления в смесь добавки разжижителя ФСР. Испытания проводились на осевое сжатие после тепловлажностной обработки бетонных образцов.

Таблица 1 – Результаты испытаний бездобавочных бетонов

№ состава	Расход материалов на 1 м ³ бетона, кг				Прочность бетона после ТВО, МПа
	Цемент	Песок	Щебень	Вода	
1	450	520	1215	200	26,8
2	575	415	1190	205	30,7
3	325	620	1245	190	20,2

Решение же рецептурно-технологических задач с использованием в бетонных смесях добавки ФСР, опиралось на современные методы планирования эксперимента, регрессионного и статистического анализа с построением геометрического образа функции отклика способами линейной алгебры [13-15].

Обработка результатов и исследований, обсуждение

Условия кодирования и варьирования факторов планируемого экспериментального исследования приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Кодирование и варьирование факторов

Факторы	Код X_i	Основной уровень, X_0 , %	Интервал варьирования, ΔX_i	Нижний уровень, «-»	Верхний уровень, «+»
Цемент	X_1	450	250	200	700
ФСР	X_2	1,8	0,8	1,0	2,6

Графически план экспериментального исследования изображен на рис. 1, а матрица планирования и условия проведения исследования представлены в таблице 3.

Согласно рис. 1 точки используемого плана экспериментального исследования имеют координаты вершин правильного шестиугольника, построенного в интервале варьирования факторов ± 1 в кодированном виде.

Выбранный план удобен тем, что переход от кодированных факторов к натуральным значениям и наоборот легко произвести графически по соответственным осям (рис. 1). По результатам семи опытов (центр шестиугольника и шесть вершин) определяют неизвестные коэффициенты регрессионного уравнения второго порядка [14,15]:

$$\hat{y}_R = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{12}X_1X_2, \quad (1)$$

$$\text{где:} \quad b_0 = (0y) - \sum_{i=1}^k(iiy); \quad b_i = 1/3(iy); \quad b_{ij} = 4/3(ijy);$$

$$b_{ii} = 2/3(iiy) + 5/6 \sum_{i=1}^k(iiy) - (0y). \quad (2)$$

$$\hat{y}_R = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2, \quad (1)$$

где:

$$b_0 = (0y) - \sum_{i=1}^k (i y); \quad b_i = 1/3(i y); \quad b_{ij} = 4/3(i j y);$$

$$b_{ii} = 2/3(i i y) + 5/6 \sum_{i=1}^k (i i y) - (0 y). \quad (2)$$

(2)

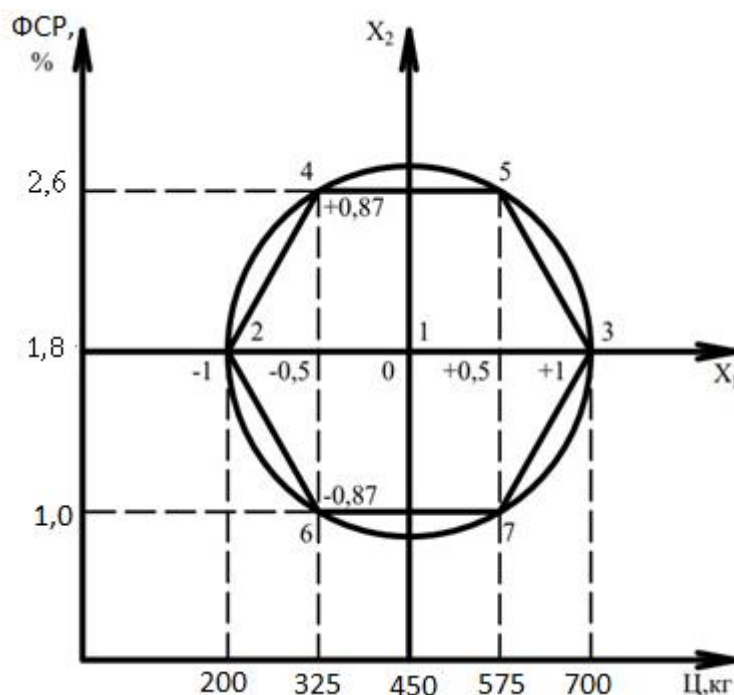


Рисунок 1 – План эксперимента на шестиугольнике

Таблица 3 - Матрица планирования и условия эксперимента

Номер опыта	План		X_1^2	X_2^2	$X_1 X_2$	Факторы	
	X_1	X_2				X_1 (Ц)	X_2 (ФСР)
1	0	0	0	0	0	450	1,8
2	-1	0	1	0	0	200	1,8
3	1	0	1	0	0	700	1,8
4	-0,5	0,87	0,25	0,75	-0,43	325	2,6
5	0,5	0,87	0,25	0,75	0,43	575	2,6
6	-0,5	-0,87	0,25	0,75	0,43	325	1,0
7	0,5	-0,87	0,25	0,75	-0,43	575	1,0

Используя формулы (2), подсчитывались коэффициенты регрессионного уравнения второго порядка, расчётные значения которых приведены ниже:

$$b_0 = 267,85 - (109,03 + 112,32) = 46,50;$$

$$b_1 = 67,70/3 = 22,57;$$

$$b_2 = 3,85/3 = 1,28;$$

$$b_{12} = 4/3 \cdot (0,96) = 1,28;$$

$$b_{11} = 2/3 \cdot (109,03) + 5/6 \cdot (109,03 + 112,32) - 267,85 = -10,71;$$

$$b_{22} = 2/3 \cdot (112,32) + 5/6 \cdot (109,03 + 112,32) - 267,85 = -8,51.$$

Для прочности бетона на сжатие после тепловлажностной обработки было получено уравнение регрессии в приведённом ниже виде:

$$\hat{y}_R = 46,50 + 22,57X_1 + 1,28X_2 - 10,71X_1^2 - 8,51X_2^2 + 1,28X_1X_2. \quad (3)$$

Регрессионный анализ полученной математической модели (3) выполним после вычисления ошибки эксперимента и подсчёта ошибок коэффициентов регрессионного уравнения. Принимая во внимание трёхкратную повторность опытов, ошибка проведённого эксперимента по воспроизводимости составила $S_{эв} = \sqrt{S_{эв}^2} = 0,58$.

Таблица 4 – Расчёт ошибок коэффициентов

b_m	b_0	b_i	b_{ii}	b_{ij}
T_i	1,0	0,577	1,224	1,155
$T_i \cdot S_{эв}$	0,58	0,335	0,710	0,670
$t \cdot T_i \cdot S_{эв}$	1,021	0,590	1,250	1,180

Таблица 5 – Регрессионный анализ модели

b_m	Начальная модель	$b_{кр}$	Конечная модель	ijy	$b_{ij}(ijy)$
b_0	46,50	1,02	46,50	267,85	12455,03
b_1	22,57	0,59	22,57	67,70	1527,99
b_2	1,28	0,59	1,28	3,85	4,94
b_{11}	-10,71	1,25	-10,71	109,03	-1167,71
b_{22}	-8,51	1,25	-8,51	112,32	-955,84
b_{12}	1,28	1,18	1,28	0,96	1,23

Сумма квадратов $SS_{мод}$ и SS :

$$SS_{мод} = 11865,64;$$

$$SS_{эв} = 4,76.$$

$$S = SS_{мод} + SS_{эв} = 11870,40$$

Произведем проверку адекватности математической модели при риске $\alpha = 0,05$, и числе степеней свободы

$$f_{на} = 7 - 6 = 1 \quad \text{и} \quad f_{на} = N(n - 1) = 14. \text{ Сумма квадратов } SS_{на} :$$

$$SS_{на} = (yy) - (SS_{мод} + SS_{эв}) = 11871,52 - (11865,64 + 4,76) = 1,12,$$

Дисперсия неадекватности $SS_{на}$ и критерий Фишера, соответственно:

$$S_{на}^2 = SS_{на} / f_{на} = 1,12 / (7-6) = 1,12 ,$$

$$F_a = 3,29 < F_T = 4,62.$$

Следовательно, можно допустить, что математическая модель (4)

$$\hat{y}_R = 46,50 + 22,57X_1 + 1,28X_2 - 10,71X_1^2 - 8,51X_2^2 + 1,28X_1X_2. \quad (4)$$

с риском $\alpha = 0,05$ адекватно отражает результаты экспериментального исследования. Анализ математической модели (4) осуществим после выявления её типа и построения соответствующего ей геометрического образа. С этой целью воспользуемся общей теорией поверхностей второго порядка [14,15], принимая:

$$b_0 - y = a_0; b_{ij} = 2a_{ij}; b_i = 2a_i; b_{ii} = 2a_{ii}$$

Инварианты кривой второго порядка - сумма коэффициентов при квадратичных членах(s), определитель, составленный из коэффициентов при старших членах (δ), определитель третьего порядка, образованный из всех коэффициентов (Δ), составят:

$$S = b_{11} + b_{22} = -10,71 - 8,51 = -19,22; \quad (5)$$

$$\delta = \begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -10,71 & 0,64 \\ 0,64 & -8,51 \end{vmatrix} = 90,73; \quad (6)$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} & 0,5b_1 \\ 0,5b_{12} & b_{22} & 0,5b_2 \\ 0,5b_1 & 0,5b_2 & b_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -10,71 & 0,64 & 11,29 \\ 0,64 & -8,51 & 0,64 \\ 11,29 & 0,64 & 46,50 \end{bmatrix} = 5317,43 \quad (7)$$

С учетом того обстоятельства, что $\delta > 0$, $\Delta \neq 0$, $S\Delta < 0$ уравнение (4) описывает эллиптическую поверхность отклика.

Используя инварианты (5), (6) и (7), представим уравнение (4) в удобной для анализа и геометрической интерпретации канонической форме:

$$\lambda_1 \bar{X}_1^2 + \lambda_2 \bar{X}_2^2 + C = 0. \quad (8)$$

Коэффициенты канонической формы определим через инварианты:

$$C = \frac{\Delta}{\delta} = \frac{5317,43}{90,73} = 58,61, \quad (9)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{S}{2} \pm \sqrt{\frac{S^2}{4} - \delta} = -9,61 \pm 1,27; \quad (10)$$

$$\lambda_1 = -10,88; \lambda_2 = -8,34.$$

С точки зрения геометрии, переход к уравнению (8) означает перемещение начала координат в центр кривой (поверхности) и поворот их на некоторый угол до совмещения с главными осями кривой (поверхностями) второго порядка.

С учётом (9) и (10) каноническая форма уравнения (4) примет вид:

$$-10,88\bar{X}_1^2 - 8,34\bar{X}_2^2 + 58,61 = R_{ТВО}, \quad (11)$$

а координаты центра поверхности отклика определятся из формул:

$$\bar{X}_{01} = \frac{\begin{vmatrix} -0,5b_1 & 0,5b_{12} \\ -0,5b_2 & b_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} \end{vmatrix}} = \frac{\begin{vmatrix} -11,29 & 0,64 \\ -0,64 & -8,51 \end{vmatrix}}{90,73} = \frac{96,49}{90,73} = 1,06,$$

$$\bar{X}_{02} = \frac{\begin{vmatrix} b_{11} & -0,5b_1 \\ 0,5b_{12} & -0,5b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} \end{vmatrix}} = \frac{\begin{vmatrix} -10,71 & -11,29 \\ 0,64 & -0,64 \end{vmatrix}}{90,73} = \frac{14,08}{90,73} = 0,155. \quad (12)$$

По канонической форме (11) полуоси эллипсов определяются из следующих ниже соотношений:

$$a = \sqrt{\frac{58,61 - R_{\text{ТВО}}}{10,88}}; \quad b = \sqrt{\frac{58,61 - R_{\text{ТВО}}}{8,34}}. \quad (13)$$

Для функции отклика, задаваясь шагом $\Delta \hat{y}_R = 6,0$, получим семейство сечений, проекции которых на факторную плоскость будут эллипсами с полуосями, определяемыми по формулам (13).

$$\begin{aligned} \text{Для } R_{\text{ТВО}} = 58,0; a &= \sqrt{\frac{58,61 - 58,0}{10,88}} = 0,236; b = \sqrt{\frac{58,61 - 58,0}{8,34}} = 0,271; \\ \text{Для } R_{\text{ТВО}} = 52,0; a &= \sqrt{\frac{58,61 - 52,0}{10,88}} = 0,779; b = \sqrt{\frac{58,61 - 52,0}{8,34}} = 0,890; \\ \text{Для } R_{\text{ТВО}} = 46,0; a &= \sqrt{\frac{58,61 - 46,0}{10,88}} = 1,076; b = \sqrt{\frac{58,61 - 46,0}{8,34}} = 1,229; \\ \text{Для } R_{\text{ТВО}} = 40,0; a &= \sqrt{\frac{58,61 - 40,0}{10,88}} = 1,310; b = \sqrt{\frac{58,61 - 40,0}{8,34}} = 1,494; \\ \text{Для } R_{\text{ТВО}} = 34,0; a &= \sqrt{\frac{58,61 - 34,0}{10,88}} = 1,504; b = \sqrt{\frac{58,61 - 34,0}{8,34}} = 1,718; \\ \text{Для } R_{\text{ТВО}} = 28,0; a &= \sqrt{\frac{58,61 - 28,0}{10,88}} = 1,680; b = \sqrt{\frac{58,61 - 28,0}{8,34}} = 1,916; \\ \text{Для } R_{\text{ТВО}} = 22,0; a &= \sqrt{\frac{58,61 - 22,0}{10,88}} = 1,834; b = \sqrt{\frac{58,61 - 22,0}{8,34}} = 2,095; \\ \text{Для } R_{\text{ТВО}} = 16,0; a &= \sqrt{\frac{58,61 - 16,0}{10,88}} = 1,979; b = \sqrt{\frac{58,61 - 16,0}{8,34}} = 2,260. \end{aligned}$$

Геометрический образ модели $\hat{y}_R(R_{\text{ТВО}})$ изображен на рис. 2.

Представленные на рисунке 2 данные свидетельствуют о том, что равной прочностью (например, 40 или 46 МПа) обладают бетоны практически на всем интервале изменения (от 1,0 до 2,6%) дозировки добавки разжижителя ФСР. Минимальные же расходы цемента в равнопрочных бетонах оказались при дозировках добавки от 1,8 до 2,2% от массы цемента, и значения эти поэтому следует считать оптимальными.

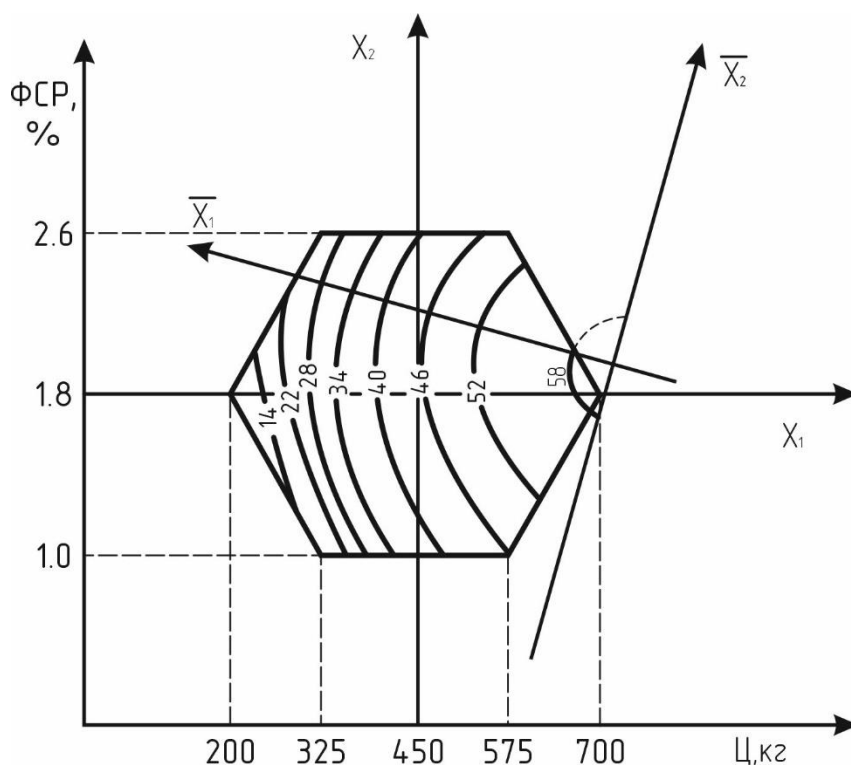


Рисунок 2 – Геометрическая интерпретация модели $\hat{y}_R$ прочности бетона после тепловлажностной обработки

Сопоставление с данными испытаний бездобавочных бетонов (таблица 1) показало, что предлагаемые составы бетонов с добавкой разжижителя ФСР, по сравнению с равносоставными бездобавочными, прочнее при сжатии на 40-60%. Из полученных данных следует, что, не прибегая к «облагораживанию» (обогащению) применяемых некондиционных заполнителей, а также к мягким режимам тепловой обработки, ускорителям твердения, дополнительному технологическому оборудованию и др., удалось существенно повысить (до 40-58 МПа) прочность бетона, за счет уменьшения расхода воды на замес без снижения подвижности смеси и на этой основе получить высокопрочный бетон на местных (региональных) заполнителях, включая мелкий некондиционный песок Грушевского месторождения. Проявление добавкой ФСР дефлокулирующего действия в гидратирующей системе «цемент-вода», способствовало резкому увеличению подвижности и текучести бетонной смеси без увеличения ее водопотребности, что существенно улучшило строительно-технические и технологические свойства бетона, обеспечив ему высокие прочностные показатели при рядовых местных региональных заполнителях.

В условиях Новочеркасского завода СМ была изготовлена опытно-промышленная партия плит на рекомендуемых местных региональных заполнителях. ФСР использовался в виде водного раствора рабочей концентрации (около 2% от массы цемента). Приготовление его отличалось большей длительностью перемешивания и контролем за процессами растворения и осаждения. Транспортировка и дозирование водного раствора ФСР осуществлялись обычными способами. Одновременно с формованием плит изготавливались и стандартные бетонные образцы. Образцы твердели вместе с плитами в заводских пропарочных камерах, после чего были испытаны в заводской строительной лаборатории. Результаты испытаний соответствовали данным проведенных исследований и отвечали техническим требованиям, предъявляемым к железобетонным плитам, предназначенным для устройства сборных облицовок каналов гидромелиоративных систем.

Заключение

Использование местных (региональных) заполнителей, включая мелкие некондиционные пески имеет для предприятий и организаций важное экономическое значение, поскольку понижается нагрузка на транспортные магистрали, сокращаются расходы на доставку заполнителей, снижается стоимость бетона, а значит и строительства в целом. Наряду с этим расширяется и сырьевая база для производства бетонных и железобетонных элементов обводнительных, оросительных и других систем, за счет использования в бетоне недорогих местных (региональных) заполнителей, включая мелкие некондиционные пески. Это стало возможным благодаря добавлению в смесь формиатно-спиртового разжижителя (ФСР), обеспечившим получение высокоподвижных с высокой степенью текучести бетонных смесей. На этой основе удалось существенно (до 40-58 МПа) повысить прочность бетона на рядовых (местных, региональных) заполнителях, благодаря уменьшению расхода воды на замес без снижения подвижности и текучести бетонной смеси. Результаты производственных испытаний соответствовали данным проведенных экспериментальных исследований и отвечали техническим требованиям, предъявляемым к железобетонным плитам, предназначенным для устройства облицовок на каналах гидромелиоративных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шевченко В.А., Щедрин В.Н., Куприянова С.В. Задачи и проблемы восстановления оросительных мелиораций на юге России // Мелиорация и водное хозяйство. 2023. № 3. С. 28–32.
2. Гулюк Г.Г. Эффективное развитие мелиоративного комплекса // Мелиорация и водное хозяйство. 2022. № 2. С. 2–6.
3. Дубяго Д.С., Новиков А.Е., Григоров С.М. Дефекты бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений мелиоративных систем Республики Беларусь // Мелиорация и водное хозяйство. 2023. № 2. С. 36–40.
4. Шилин А.А., Кириленко А.М., Знайченко П.А. Современный подход к разработке решений по ремонту железобетонных конструкций гидротехнических сооружений // Транспортное строительство. 2017. № 12. С. 6–10.
5. Линевиц С.Н., Каплин В.Т., Багогосян А.Т. Введение в экологию, экологическая безопасность России, экологическое образование: учебное пособие / Под ред. С.Н. Линевица. Ростов-на-Дону: Изд-во ООО «Терра», 2000. 80 с.
6. Несветаев Г.В. Эффективность применения суперпластификаторов в бетонах // Строительные материалы. 2006. № 10. С. 23-25.
7. Голованов А.И. Основы природообустройства. Москва: Колос, 2001. 262 с.
8. Несветаев Г.В. Строительные материалы: учебное пособие. Ростов-на-Дону: Феникс, 2009. 608 с.
9. Комохов П.Г. Цементы, бетоны, строительные растворы и сухие смеси. СПб.: НПО «Профессионал», 2007. 804 с.
10. Макридин Н.И., Максимова Н.Н. Структура, деформативность, прочность и критерий разрушения цементных композитов. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2001. 280 с.
11. Причины разрушения и концепция ремонта бетонных и железобетонных конструкций гидротехнических сооружений / В.М. Давиденко, Г.Ф. Пахомова, Г.В. Охалкин и др. // Известия ВНИИГ им Б. Е. Веденеева. 2017. Т. 286. С. 3–9.
12. Абдразаков Ф.К., Рукавишников А.А., Сафин Э.Э. Покрытие оросительных каналов инновационным бетонным полотном и адаптивные способы их эксплуатации. // Мелиорация и водное хозяйство. 2023. №2. С. 27–31.

13. Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и железобетонных сооружений. Москва: Стройиздат, 1984. 671 с.

14. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. Москва: Финансы и статистика, 1981. 262 с.

15. Юдин М.И. Планирование эксперимента и обработка результатов. Краснодар: Изд-во КГАУ, 2004. 239 с.

REFERENCES

1. Shevchenko V.A., Shchedrin V.N., Kupriyanova S.V. *Zadachi i problemy vosstanovleniya orositel'nykh melioratsiy na yuge Rossii* [Tasks and problems of restoration of irrigation land reclamation in the south of Russia]. *Melioratsiya i vodnoe hozyajstvo*. 2023. No. 3, pp. 28–32.

2. Gulyuk G.G. *Effektivnoe razvitie meliorativnogo kompleksa* [Effective development of the land reclamation complex]. *Melioratsiya i vodnoe hozyajstvo*. 2022. No. 2, pp. 2–6.

3. Dubyago D.S., Novikov A.E., Grigorov S.M. *Defekty betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy gidrotekhnicheskikh sooruzhenij meliorativnykh sistem Respubliki Belarus'* [Defects of concrete and reinforced concrete structures of hydraulic structures of reclamation systems of the Republic of Belarus]. *Melioratsiya i vodnoe hozyajstvo*. 2023. No. 2, pp. 36–40.

4. Shilin A.A., Kirilenko A.M., Znajchenko P.A. *Sovremennyy podhod k razrabotke reshenij po remontu zhelezobetonnykh konstruktsiy gidrotekhnicheskikh sooruzhenij* [Modern approach to the development of solutions for the repair of reinforced concrete structures of hydraulic structures]. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2017. No. 12, pp. 6–10.

5. Linevich S.N., Kaplin V.T., Bagogosyan A.T. *Vvedenie v ekologiyu, ekologicheskaya bezopasnost' Rossii, ekologicheskoe obrazovanie: uchebnoe posobie* [Introduction to ecology, environmental safety of Russia, environmental education: a textbook]. Edit. S.N. Linevich. Rostov-na-Donu: Izd-vo OOO «Terra», 2000. 80 p.

6. Nesvetaev G.V. *Effektivnost' primeneniya superplastifikatorov v betonah* [The effectiveness of the use of superplasticizers in concrete]. *Stroitel'nye materialy*. 2006. No. 10. pp. 23–25.

7. Golovanov A.I. *Osnovy prirodoobustrojstva: ucheboe posobie* [Fundamentals of environmental management: study guide]. Moscow: Kolos, 2001. 262 p.

8. Nesvetaev G.V. *Stroitel'nye materialy: uchebno-spravochnoe posobie* [Building materials: an educational and reference manual]. Rostov-na-Donu: Feniks, 2009. 608 p.

9. Komohov P.G. *Cementy, betony, stroitel'nye rastvory i suhie smesi* [Cements, concretes, mortars and dry mixes]. St. Petersburg: NPO "Professional", 2007. 804 p.

10. Makridin N.I., Maksimova N.N. *Struktura, deformativnost', prochnost' i kriterij razrusheniya cementnykh kompozitov* [Structure, deformability, strength, and fracture criteria of cement composites]. Saratov: Saratov University Publ., 2001. 280 p.

11. Davidenko V.M., G.V. Pahomova, G.V. Ohapkin i dr. *Prichiny razrusheniya i koncepciya remonta betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy gidrotekhnicheskikh sooruzhenij* [Causes of destruction and the concept of repair of concrete and reinforced concrete structures of hydraulic structures]. *Izvestiya VNIIG im B. E. Vedeneeva*. 2017. Vol. 286, pp. 3–9.

12. Abdrazakov F.K., Rukavishnikov A.A., Safin E.E. *Pokrytie orositel'nykh kanalov innovatsionnym betonnym polotnom i adaptivnye sposoby ih ekspluatatsii. // Melioratsiya i vodnoe hozyajstvo*. 2023. №2. S. 27–31.

13. Bazhenov Yu.M., Komar A.G. *Tekhnologiya betonnykh i zhelezobetonnykh sooruzhenij* [Technology of concrete and reinforced concrete structures]. Moscow: Stroyizdat, 1984. 671 p.

14. Voznesenskij V.A. *Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyakh* [Statistical methods of experiment planning in technical and economic research]. Moscow: Finance and Statistics, 1981. 262 p.

15. Yudin M.I. *Planirovanie eksperimenta i obrabotka rezul'tatov* [Experiment planning and results processing]. Krasnodar: KGAU, 2004. 239 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
<i>Федоров Виктор Матвеевич</i> – профессор, доктор технических наук, Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова, ФГБОУ ВО Донской ГАУ, (346428, Россия, г. Новочеркасск, ул. Пушкинская, д. 111), e-mail: viktor-fedorov1955@yandex.ru.	<i>Viktor Fedorov</i> – Professor, Dr.Sci.(Eng), Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute named after A.K. Kortunov, Donskoy GAU (346428, Russia, Pushkinskaya str., 111), e-mail: viktor-fedorov1955@yandex.ru.
<i>Васильева Елена Викторовна</i> – доцент, кандидат технических наук, Южно-Российский гос. политехнический университет им. М.И. Платова, (346428, Россия, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132), e-mail: karalenka5@yandex.ru	<i>Vasilyeva Elena Viktorovna</i> – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, M.I.Platov South Russian State Polytechnic University (346428, Russia, Novocherkassk, Prosvesheniya, 132), e-mail: karalenka5@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 05.04.2025; одобрена после рецензирования 18.05.2025, принята к публикации 16.05.2025.

The article was submitted 05.04.2024; approved after reviewing 18.05.2024; accepted for publication 16.05.2024.

Научная статья
УДК 004.42

ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ С ИГРОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ОГЭ ПО ИНФОРМАТИКЕ

А.В. Савченко¹, А.С. Вараксина¹, И.Д. Рудинский^{1,*}

¹ Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград, Россия

* E-mail: irudinskii@kantiana.ru

Аннотация. Современное образование активно интегрирует цифровые инструменты для повышения эффективности обучения, однако проблема мотивации учащихся при подготовке к экзаменам остаётся актуальной. Целью исследования является разработка мобильного приложения, совмещающего учебный контент с игровыми элементами для повышения вовлечённости в процесс самостоятельной подготовки к ОГЭ по информатике. Для достижения поставленной цели была спроектирована клиент-серверная архитектура на базе REST API, реализованная с использованием современных фреймворков и библиотек: на стороне клиента – Kotlin и Jetpack Compose, на серверной стороне – FastAPI и SQLite. При проектировании использовался модульный подход – клиентская и серверная часть разбиты на модули, каждый из которых реализует собственный функционал. Геймифицированные механики включают накопление опыта, скрытые достижения, задания, уровень и игру. Результатом работы стало мобильное приложение, предоставляющее доступ к теоретическим материалам, тренировочным задачам, пробному варианту экзамена и игровому модулю, а также реализующее функционал учителя: добавление, редактирование и удаление практических задач, просмотр списка и статистики закрепленных учеников.

Ключевые слова: геймификация; мобильное приложение; подготовка к ОГЭ по информатике; клиент-серверная архитектура; модульная структура.

Для цитирования: Савченко А.В., Вараксина А.С., Рудинский И.Д. Образовательное приложение с игровыми элементами для подготовки к ОГЭ по информатике // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2025. Т. 11. № 2. С. 54–66.

Original article

AN EDUCATIONAL APPLICATION WITH GAME ELEMENTS FOR PREPARING FOR THE MSE IN COMPUTER SCIENCE

A.V. Savchenko¹, A.S. Varaksina¹, I.D. Rudinskiy^{1,*}

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

* E-mail: irudinskii@kantiana.ru

Abstract. Modern education actively integrates digital tools to enhance learning effectiveness; however, the issue of student motivation during exam preparation remains relevant. The aim of this study is to develop a mobile application that combines instructional content with game elements to increase engagement in the process of independent preparation for the MSE in Computer Science. To achieve this goal, a client-server architecture based on a REST API was designed and implemented using modern frameworks and libraries: on the client side – Kotlin and Jetpack Compose; on the server side – FastAPI and SQLite. A modular approach was applied in the design: both client and server are divided into modules, each responsible for its own functionality. Gamified mechanics include experience point accumulation, hidden achievements, quests, leveling,

and an embedded game. The outcome of this work is a mobile application providing access to theoretical materials, practice exercises, a mock exam, and a game module, as well as teacher functionality: adding, editing, and deleting quizzes, and viewing lists and statistics of assigned students.

Key words: *gamification; mobile application; preparation for the MSE in computer science; client-server architecture; modular structure.*

For citation: Savchenko A.V., Varaksina A.S., Rudinskiy I.D. An educational application with game elements for preparing for the MSE in computer science. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11. No 2. pp. 54–66.

Введение

В современную образовательную среду активно вовлекаются цифровые технологии для повышения эффективности обучения [1]. Геймификация обучения, т. е. системная практика реинжиниринга, в рамках которой реструктуризируются существующие либо проектируются новые образовательные процессы или системы путем внедрения игровых компонентов без изменения образовательных целей [2, 3], может значительно повысить мотивацию и вовлечённость обучающихся [4, 5]. Кроме того, важно учитывать растущую популярность мобильных образовательных приложений [6], обеспечивающих доступ к образовательному контенту в любое время и в любом месте [7, 8]. В этой связи представляется актуальным создание мобильных приложений, сочетающих теоретические материалы и тренировочные тесты по конкретным дисциплинам с элементами игры. Цель настоящей работы – создание образовательного приложения с игровыми механиками для самостоятельной подготовки к ОГЭ по информатике, реализующего функционал как для обучающихся, так и для учителей.

Игровые механики

Важной особенностью приложения являются геймифицированные механики. Пользователь накапливает очки опыта за выполнение заданий, индивидуальные достижения, успешное прохождение тестов и результаты игры. За счёт очков опыта происходит повышение уровня обучающегося.

Достижения присуждаются за выполнение определённых условий: например, за правильные ответы на серию вопросов или за победу над противниками в игре. Условия учебных заданий известны заранее.

В приложении реализована игра, суть которой заключается в управлении летательным аппаратом, уклонении от астероидов и сражениях с противниками. Сражение реализовано следующим способом: при встрече с противником появляется вопрос по информатике с вариантами ответов. За правильный ответ начисляются очки опыта, за неправильный – очки списываются и снимается одна жизнь. Изначально у игрока 3 жизни; если счетчик достигнет 0, то игра завершится.

В приложении реализована таблица лидеров по уровню. В ней отображаются 10 пользователей с самым высоким уровнем.

Функциональность приложения

Помимо игровых элементов для обучающегося приложение предоставляет и другие возможности. В частности, оно содержит теоретические материалы по темам ОГЭ в формате текстовых заметок; обучающийся может решать тренировочные задания различных типов, аналогичные заданиям из ОГЭ. Также у обучающегося есть возможность пройти пробный вариант экзамена. Пользовательский профиль хранит уровень и статистику, что позволяет видеть динамику прогресса.

Приложение предусматривает и функционал для учителя. Преподаватель может добавлять новые задания, просматривать, редактировать и удалять добавленные ранее

задания. Также учитель может просматривать список закрепленных за ним обучающихся и их статистику.

Архитектура системы

Разрабатываемое приложение представляет собой двухзвенную систему «клиент-сервер», где клиентская часть выполняется на мобильном устройстве, а серверная отвечает за хранение данных и бизнес-логику [9] (рис.1).

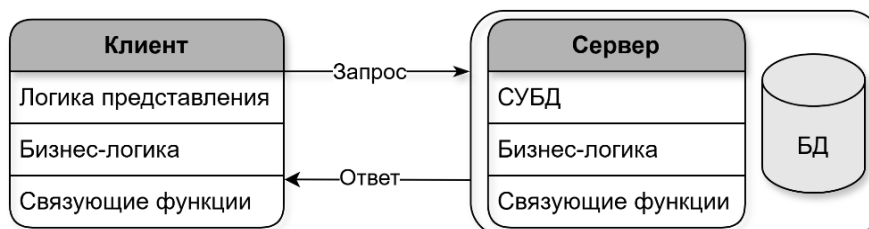


Рисунок 1 – Схема архитектуры системы

Клиент и сервер обмениваются данными по API через сеть. После авторизации (входа/регистрации) клиентское приложение сохраняет полученный JWT-токен и передаёт его в заголовках последующих запросов для подтверждения прав доступа. Запросы к серверу осуществляются методами HTTP (GET, POST и др.). Например, клиент запрашивает список тестов, отправляет выбранные ответы и получает результат проверки. На сервере обрабатываются эти запросы, выполняются операции с базой данных и формируется JSON-ответ клиенту. Такая схема обеспечивает разделение логики: клиентское приложение занимается взаимодействием с пользователем и отображением данных, а сервер выполняет функции хранилища и валидации. Взаимодействие по REST API упрощает модульное развитие приложения.

Разработка клиентской части

Клиентская часть реализована на языке программирования Kotlin с использованием современных Android-компонентов. Пользовательский интерфейс строится с помощью Jetpack Compose – фреймворка для декларативного описания UI [10]. Это позволяет гибко формировать экранные элементы (списки, формы, кнопки и т.д.) и реагировать на изменения состояния данных. Для хранения теоретических материалов на устройстве используется библиотека Room – абстрактный слой над СУБД SQLite [11]. В качестве HTTP-клиента выбран Ktor, обеспечивающий асинхронную работу с REST API сервера¹. Внедрение зависимостей осуществляется с помощью Kodein. Клиентская часть разделена на 8 модулей: «Авторизация», «Учитель», «Профиль», «Теория», «Достижения», «Игра», «Практика», «Задания». Каждый модуль ответственен за определенный функционал. Диаграмма модулей представлена на рис.2.

¹ Ktor Documentation. Официальная документация библиотеки Ktor [Электронный ресурс]. URL: <https://ktor.io/docs/welcome.html> (дата обращения: 08.05.2025).

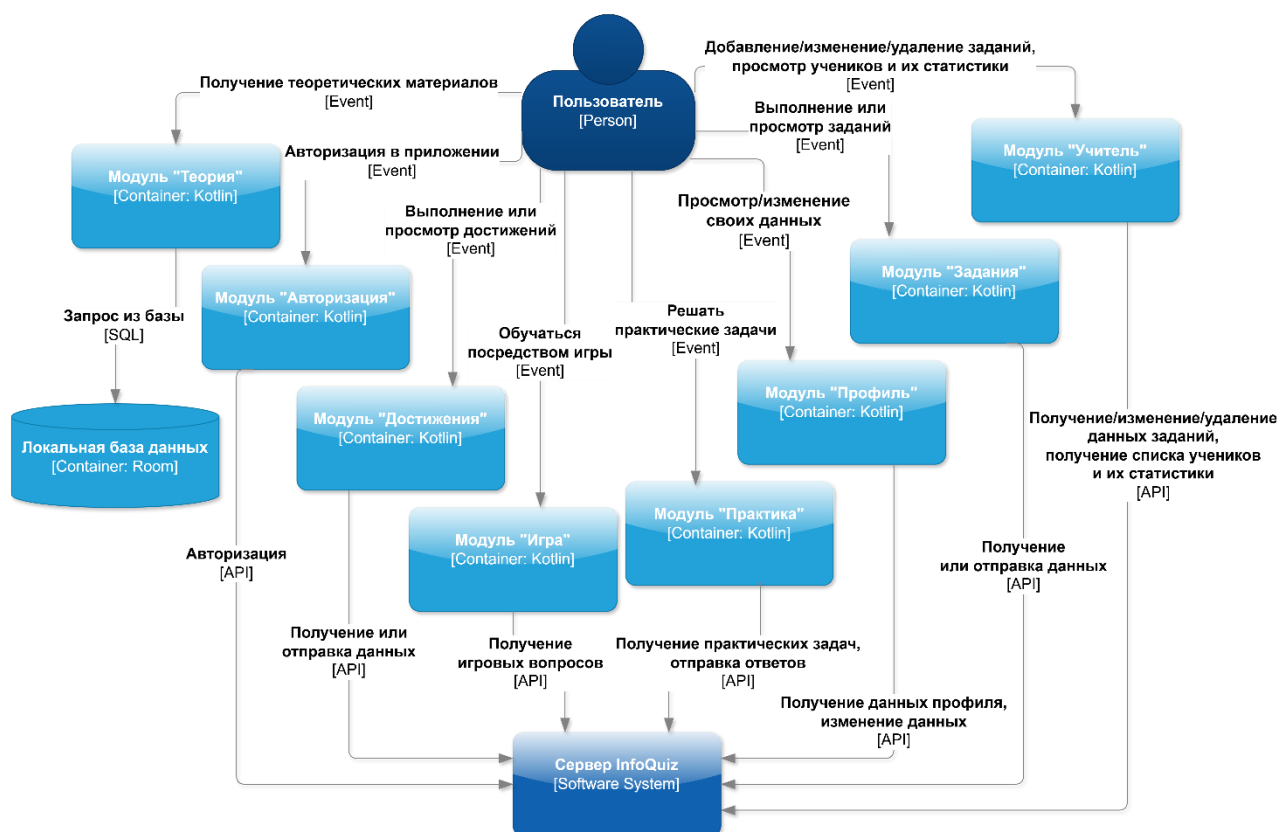


Рисунок 2 – Диаграмма модулей

Клиентская часть разбита на четыре слоя (рис.3).

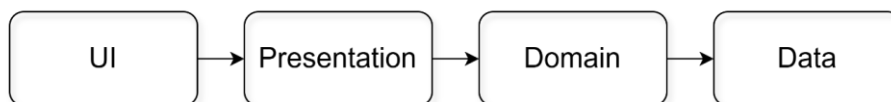


Рисунок 3 – Схема архитектуры клиентской части приложения

Пользовательский интерфейс (UI) обеспечивает приём и отображение информации пользователя. Представление (Presentation) реализует логику, по которой будет отображаться информация в UI-слое. В слое домена (Domain) реализуется бизнес-логика приложения. Слой данных (Data) служит для взаимодействия с серверной частью и локально базой данных.

Разработка серверной части

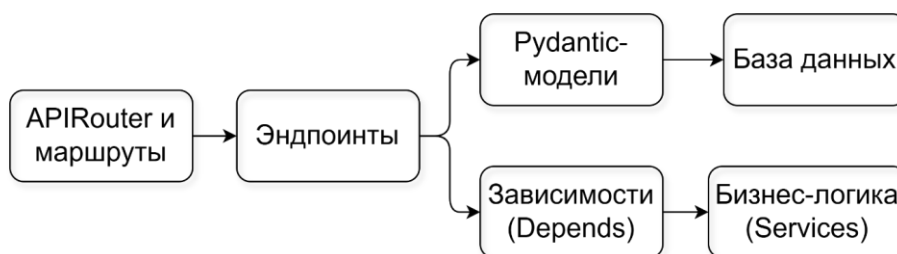
Серверная часть приложения развернута на Python с использованием FastAPI – легковесного фреймворка для построения API. FastAPI работает асинхронно, что позволяет обрабатывать запросы и авторизацию без блокировки. Для аутентификации и авторизации пользователей применяется JWT (JSON Web Token), обеспечивая передачу зашифрованных токенов с правами доступа в заголовках запросов. Все данные хранятся с использованием СУБД SQLite, выбранной за простоту развёртывания. FastAPI автоматически генерирует документацию API (Swagger), что упрощает взаимодействие с фронтендом². Сервер разделен на 7 модулей, каждый модуль отвечает за свой набор функционала: «Авторизация»,

² FastAPI. Официальная документация веб-фреймворка FastAPI [Электронный ресурс]. URL: <https://fastapi.tiangolo.com/ru/> (дата обращения: 09.05.2025).

```
graph TD
    User((Пользователь [Person]))
    App[Мобильное приложение InfoQuiz [Software System]]
    AuthMod[Модуль «Авторизация» [Container: Python]]
    AchievMod[Модуль «Достижения» [Container: Python]]
    PractMod[Модуль «Практические задачи» [Container: Python]]
    GameMod[Модуль «Игра» [Container: Python]]
    QuestMod[Модуль «Задания» [Container: Python]]
    ProfileMod[Модуль «Профиль» [Container: Python]]
    TeacherMod[Модуль «Учитель» [Container: Python]]
    DB[(База данных [Container: SQLite])]

    User -- "Аутентификация, решение заданий, просмотр достижений, просмотр квестов, просмотр статистики, чтение теории, игра [Event]" --> App
    App -- "Получение или отправка данных [API]" --> AuthMod
    App -- "Получение или отправка данных [API]" --> ProfileMod
    App -- "Получение практических задач, отправка ответов [API]" --> PractMod
    App -- "Получение игровых вопросов [API]" --> GameMod
    App -- "Получение или отправка данных [API]" --> QuestMod
    App -- "Получение/изменение/удаление данных заданий, получение списка учеников и их статистики [API]" --> TeacherMod
    AuthMod -- "Создание записи пользователя, аутентификация [SQL]" --> DB
    DB -- "Получение данных, отметка о выполнении [SQL]" --> AuthMod
    DB -- "Получение данных, свертка ответов [SQL]" --> PractMod
    PractMod -- "Получение данных, свертка ответов [SQL]" --> DB
    DB -- "Получение данных [SQL]" --> GameMod
    GameMod -- "Получение данных [SQL]" --> DB
    DB -- "Получение данных, отметка о выполнении [SQL]" --> QuestMod
    QuestMod -- "Получение данных, отметка о выполнении [SQL]" --> DB
    DB -- "Получение/изменение/удаление данных [SQL]" --> TeacherMod
    TeacherMod -- "Получение/изменение/удаление данных [SQL]" --> DB
```

Сервер разбит на шесть слоёв (рис.5).



APIRouter'ы и маршруты отвечают за группировку эндпоинтов по модулям и их регистрацию на сервере. Эндпоинты обрабатывают HTTP-запросы, в них вызываются межкомпонентные зависимости и бизнес-логика. Pydantic-модели отвечают за сериализацию входных и выходных данных. В слое базы данных хранятся и извлекаются данные,

регистрируются транзакции. Зависимости отвечают за переиспользование компонентов. Слой бизнес-логики отвечает за реализацию конкретного функционала.

Такой подход позволяет централизованно управлять всеми частями системы, легко масштабировать и модифицировать игровые механики и учебный контент. Модульная структура единой кодовой базы обеспечивает гибкое управление валидацией, обработку бизнес-логики и беспрепятственную интеграцию с мобильным клиентом через REST API.

Демонстрация учебно-игрового процесса

На рис.6 изображен главный экран разработанного приложения.

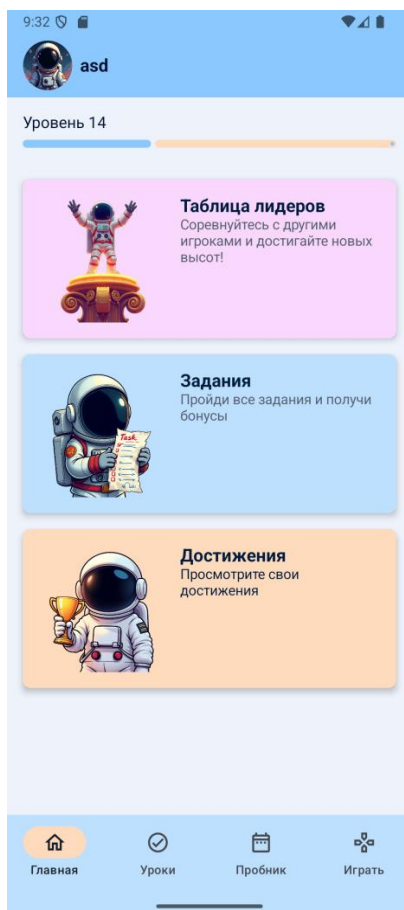


Рисунок 6 – Главный экран приложения

С главного экрана пользователь может перейти к просмотру таблицы лидеров, заданий, достижений, теоретическим материалам, практическим задачам, пробному варианту экзамена и игре. На рис.7 изображен экран игрового процесса.

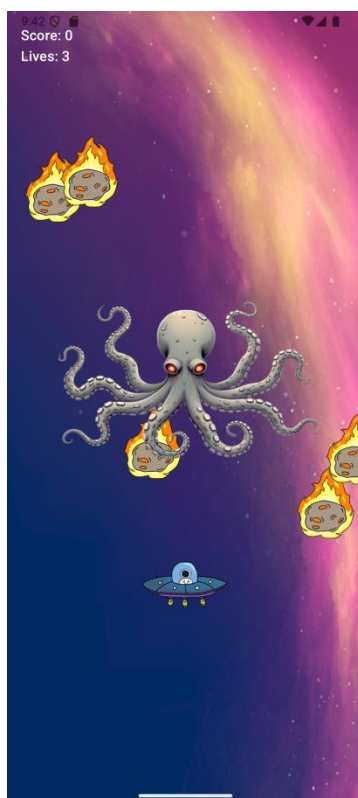


Рисунок 7 – Экран игрового процесса

В процессе игры пользователь управляет космическим аппаратом, уклоняется от летящих астероидов. На экране виден противник – осьминог, при встрече с ним появляется всплывающее окно с вопросом по информатике и двумя вариантами ответов (рис.8).

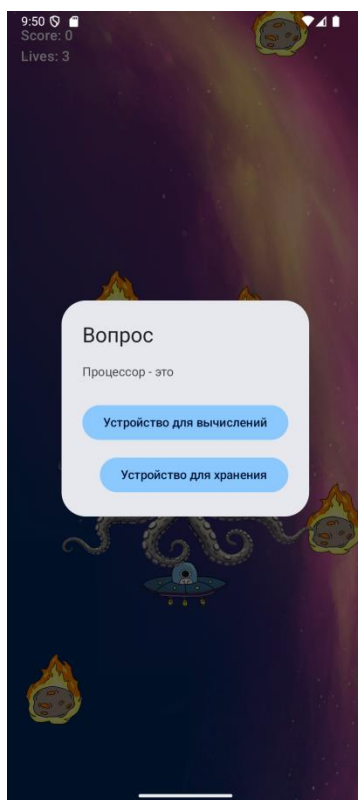


Рисунок 8 – Всплывающее окно с вопросом по информатике

При выборе правильного ответа пользователю начисляются очки, а при неправильном – снимется одна жизнь. Когда счетчик жизни дойдет до нуля, появится всплывающее окно завершения игры (рис.9).

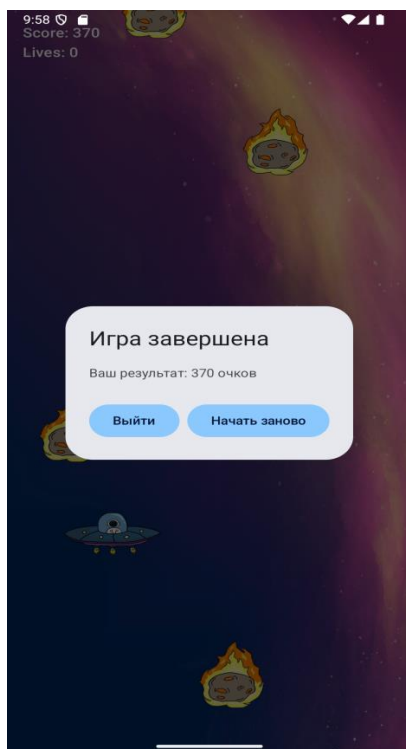


Рисунок 9 – Всплывающее окно завершения игры

Окно содержит информацию о заработанных в процессе игры очках, а также кнопки для перехода на главный экран и перезапуска игры. Помимо обучающий игры в приложении реализован и классический подход к обучению в виде теоретических материалов и практических задач. На рис.10 представлен экран с теоретическими материалами.

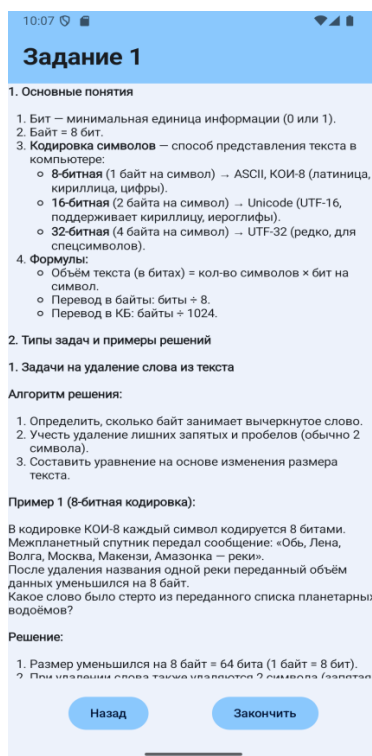


Рисунок 10 – Экран теории

Текст структурирован, содержит ключевые понятия, формулы, примеры задач и их решение. На рис.11 представлен экран практических задач.

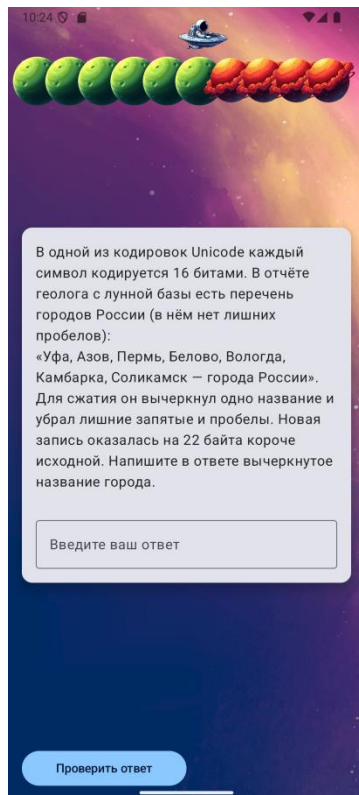


Рисунок 11 – Экран практики

Экран содержит условие задачи, поле для ввода ответа и кнопку для проверки ответа. Если ученик ввел неправильный ответ, то условие задачи подсвечивается красным цветом и появляется верный ответ (рис.12).

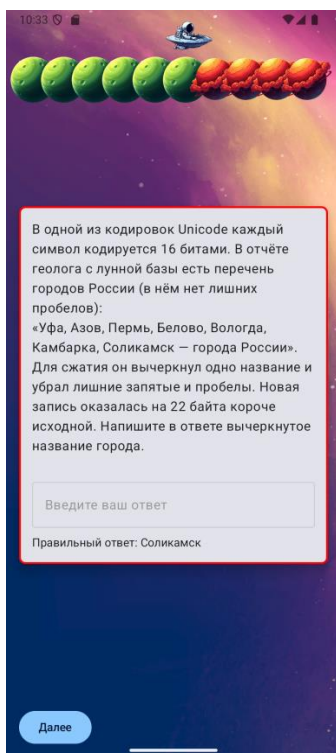


Рисунок 12 – Реакция на ввод неверного ответа

Если ответ введен верно, то условие подсвечивается зеленым цветом (рис.13).

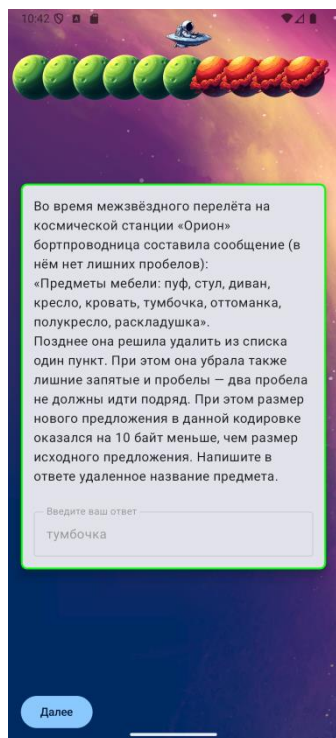


Рисунок 13 – Реакция на ввод правильного ответа

Продemonстрированный функционал позволяет увлечь ученика и делает процесс изучения предмета увлекательным.

Заключение

В результате исследования было разработано мобильное образовательное приложение для самостоятельной подготовки к ОГЭ по информатике. Реализованное решение сочетает традиционные методы обучения с игровыми механиками и направлено на повышение мотивации и вовлеченности учащихся в процесс самостоятельной подготовки. Архитектура системы, основанная на клиент-серверной модели, обеспечивает гибкость и масштабируемость. Использование JWT-аутентификации и REST API обеспечивает безопасность и удобство расширения функционала, а модульная структура обеих частей приложения упрощает дальнейшую поддержку и развитие проекта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Куркина Н.Р., Стародубцева Л.В. Цифровые технологии как фактор повышения эффективности образовательного процесса // Вестник Самарского университета. Экономика и управление. 2018. №1. С. 14–17.
2. Бусель С.В., Рудинский И.Д. Игрофикация как концептуальная основа модернизации образовательной среды // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т.9. № 1. С. 101–125.
3. Рудинский И.Д., Бусель С.В. Игровые образовательные технологии и практики: предпосылки и особенности применения // Отечественная и зарубежная педагогика. 2024. Т. 1, № 1 (97). С. 39-61.
4. Асадуллин А.А. Применение геймификации в современной системе образования // Материалы XII Международной научно-практической конференции «Современные тенденции и инновации в науке и производстве». 2023. URL: https://kuzstu.su/dmdocuments/INPK/12INPK_Sbornic-2023/pages/Секция%203/305.pdf (дата обращения: 09.05.2025).
5. Конева С.Х. Геймификация как инструмент улучшения образовательной сферы // World of Scientific news in Science International Journal. 2024. Т.2. №3. URL: <https://worldofresearch.ru/index.php/wsjs/article/view/394/390> (дата обращения: 18.05.2025).
6. Плаксина Н.В., Овчинникова М.В. Актуальные тренды цифровизации образования в мире // Ученые записки. Электронный научный журнал Курского государственного университета. 2024. №1 (69). С. 181-188.
7. Горюнова М.А., Лебедева М.Б. Мобильное обучение в контексте реализации ФГОС // ЧиО. 2016. №4 (49). С. 91-95.
8. Юрьева Д.В. Мобильное обучение в российском вузе // МНКО. 2021. №4 (89). С. 244-246.
9. Мизанбаев А.Е. Технология разработки приложения с двухуровневой клиент-серверной архитектурой // Вестник магистратуры. 2019. №9-2 (96). С. 14–16.
10. Дындин А.В., Новиков П.С. Исследование применения Kotlin Multiplatform и Jetpack Compose Multiplatform в мобильной разработке // Вестник науки. 2024. №4 (73). С. 410–421.
11. Винников М.Д. Разработка базы данных для мобильного приложения на операционной системе Android // Научные известия. 2022. №29. С. 39–42.

REFERENCES

1. Kurkina N.R., Starodubceva L.V. *Cifrovye tekhnologii kak faktor povysheniya effektivnosti obrazovatel'nogo processa* [Digital technologies as a factor in improving the effectiveness of the educational process]. *Vestnik Samarskogo universiteta. Ekonomika i upravlenie*. 2018. No. 1, pp. 14–17.
2. Busel S.V., Rudinskiy I.D. *Igrofikaciya kak konceptual'naya osnova modernizacii obrazovatel'noj sredy* [Gamification as a conceptual basis for educational setting modernization] *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2023. V.9, No. 1, pp. 101–125.
3. Rudinsky I.D., Busel S.V. *Igrovye obrazovatel'nye tekhnologii i praktiki: predposylki i osobennosti primeneniya* [Game-based educational technologies and practices: preconditions and application features]. *Otechestvennaya i zarubezhnaya pedagogika*. 2024. Vol. 1, No. 1 (97), pp. 39–61.
4. Asadullin A.A. *Primenenie gejmfikacii v sovremennoj sisteme obrazovaniya* [The use of gamification in the modern education system] *Materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennye tendencii i innovacii v nauke i proizvodstve»*. 2023. URL: https://kuzstu.su/dmdocuments/INPK/12INPK_Sbornic-2023/pages/Секция%203/305.pdf (date accessed: 09.05.2025).
5. Koneva S.H. *Gejmifikaciya kak instrument uluchsheniya obrazovatel'noj sfery* [Gamification as a tool for improving the educational sphere]. *World of Scientific news in Science International Journal*. 2024. V.2, No. 3. URL: <https://worldofresearch.ru/index.php/wsjs/article/view/394/390> (date accessed: 18.05.2025).
6. Plaksina N.V., Ovchinnikova M.V. *Aktual'nye trendy cifrovizacii obrazovaniya v mire* [Global trends of digital transformation in education]. *Uchenye zapiski. Elektronnyj nauchnyj zhurnal Kurskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2024. No. 1 (69), pp. 181–188.
7. Goryunova M.A., Lebedeva M.B. *Mobil'noe obuchenie v kontekste realizacii FGOS* [Mobile learning in the context of federal state educational standards]. *ChiO*. 2016. No. 4 (49), pp. 91–95.
8. Yur'eva D.V. *Mobil'noe obuchenie v rossijskom vuze* [Mobile learning in a russian university]. *MNKO*. 2021. No. 4 (89), pp. 244–246.
9. Mizanbaev A.E. *Tekhnologiya razrabotki prilozheniya s dvuhurovnevoj klient-servernoj arhitekturoj* [Application development technology with a two-tier client-server architecture]. *Vestnik magistratury*. 2019. No. 9-2 (96), pp. 14–16.
10. Dyndin A.V., Novikov P.S. *Issledovanie primeneniya Kotlin Multiplatform i Jetpack Compose Multiplatform v mobil'noj razrabotke* [Research on the use of Kotlin Multiplatform and Jetpack Compose Multiplatform in mobile development]. *Vestnik nauki*. 2024. No. 4 (73), pp. 410–421.
11. Vinnikov M.D. *Razrabotka bazy dannyh dlya mobil'nogo prilozheniya na operacionnoj sisteme Android* [Development of a database for a mobile application running on the Android operating system]. *Nauchnye izvestiya*. 2022. No. 29, pp. 39–42.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
<i>Савченко Александр Владимирович</i> – студент, Балтийский федеральный университет имени И. Канта (236041, Россия, г. Калининград, ул. Александра Невского, д.14, e-mail: AVSavchenko7@stud.kantiana.ru.	<i>Savchenko Aleksander Vladimirovich</i> – Student, Immanuel Kant Baltic Federal University (236041, Russia, Kaliningrad, Aleksandra Nevskogo str., 14, e-mail: AVSavchenko7@stud.kantiana.ru.
<i>Вараксина Ангелина Сергеевна</i> – студент, Балтийский федеральный университет имени И. Канта (236041, Россия, г. Калининград, ул. Александра Невского, д.14, e-mail: ASVaraksina@stud.kantiana.ru.	<i>Varaksina Angelina Sergeevna</i> – Student, Immanuel Kant Baltic Federal University (236041, Russia, Kaliningrad, Aleksandra Nevskogo str., 14, e-mail: ASVaraksina@stud.kantiana.ru.



<i>Рудинский Игорь Давидович</i> – доктор педагогических наук, кандидат технических наук, профессор, Балтийский федеральный университет имени И. Канта (236000, Россия, г. Калининград, ул. Чернышевского, д.56а, e-mail: irudinskii@kantiana.ru .	<i>Rudinskiy Igor Davidovich</i> – Dr.Sci.(Edu), Ph.D.(Eng), Prof., Immanuel Kant Baltic Federal University (236000, Russia, Kaliningrad, Chernyshevskogo str., 56a, e-mail: irudinskii@kantiana.ru .
--	---

Статья поступила в редакцию 10.05.2025; одобрена после рецензирования 21.05.2025, принята к публикации 28.05.2025.

The article was submitted 10.05.2025; approved after reviewing 21.05.2025; accepted for publication 28.05.2025.

Научная статья
УДК 628.393:624.136

ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СТЕНЫ ОГРАЖДАЮЩИХ ДАМБ ХРАНИЛИЩ ЖИДКИХ ОТХОДОВ: КРАТКИЙ ОБЗОР

М.П. Саинов^{1*}, Н.С. Талалаев²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

* E-mail: SainovMP@mpei.ru

Аннотация. Ограждающие дамбы хранилищ жидких промышленных отходов (хвостохранилищ, шламонакопителей, золошлакоотвалов) отличаются от плотин водохранилищ условиями работы и конструкциями, в т.ч. конструкциями противофильтрационных устройств. Авторами были изучены особенности противофильтрационных стен дамб хвостохранилищ путём составления обзора технической информации об эксплуатируемых и проектируемых объектах хранения отходов. Было установлено, что стены применяются и как самостоятельные противофильтрационные устройства, так и в комбинации с экранами. Они являются единственным решением в случаях, когда необходимо исключить фильтрацию через проницаемое основание или восстановить водонепроницаемость тела дамбы при ремонте. Используются разные способы возведения противофильтрационных стен: «стена в грунте», буросекущихся свай, смешивания грунта с цементом. В хвостохранилищах применяют особый тип конструкций стен – композитные стены, которые включают водонепроницаемые преграды из полимеров.

Ключевые слова: хвостохранилище; дамба; противофильтрационная стена; стена в грунте; диафрагма; буросекущиеся сваи.

Для цитирования: Саинов М.П., Талалаев Н.С. Противофильтрационные стены ограждающих дамб хранилищ жидких отходов: краткий обзор // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2025. Т. 11. № 2. С. 67–78.

Original article

CUTOFF WALLS OF TAILING DAMS: A BRIEF REVIEW

M.P. Sainov^{1,2*}, N.S. Talalev²

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

* E-mail: SainovMP@mpei.ru

Abstract. Tailings dam differs from reservoir dams by conditions of performance and structural designs including the designs of seepage control structures. The authors studied the peculiarities of seepage control walls of tailings dams by compilation of the review of technical information on the existing and designed structures for storage of tailings. It was established that the walls are also used both as autonomous seepage control facilities and in combination with impervious faces. They are the only solution in cases when it is necessary to avoid seepage through the pervious foundation or restore water permeability of the dam body during repairs. Different methods are used in construction of seepage control walls: a slurry wall, secant bored piles, mixing

soil with cement. A special type of wall structural designs is used, i.e. composite walls including seepage control elements made of polymers.

Key words: tailing; dam; cutoff wall; slurry wall; diaphragm wall; secant bored piles.

For citation: Sainov M.P., Talalaev N.S. Cutoff walls of tailing dams: A brief review. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11, No. 2, pp. 67–78.

Введение

С середины XX века в гидротехническом строительстве активно применяются противофильтрационные завесы в виде сплошных стен, прорезающих грунтовый массив. Такие завесы обычно выполняются методами «стена в грунте» и буросекущихся свай.

Известно, что в СССР метод «стена в грунте» был впервые применён для создания противофильтрационной завесы ещё в 1956 г. Стена длиной 947 м и максимальной глубиной 40 м перекрыла грунтовую толщу в основании Шерубай-Наринской (Чурубай-Нуринской) плотины водохранилища Карагандинской ГРЭС-2 в Казахстане [1]. Она была выполнена из буросекущихся свай диаметром 600–700 мм, заполненных суглинисто-бentonитовым раствором.

Стен-завесы обладают рядом преимуществ по сравнению с инъекционными завесами: гарантированное пересечение водопроницаемого слоя, возможность выполнить завесу в грунте любого вида и экономичность.

Противофильтрационные стены-завесы широко применяются в строительстве плотин. Они устраиваются не только в основании плотин (бетонных и грунтовых), но и в теле грунтовых плотин, в последнем случае их относят к диафрагмам. Стены-диафрагмы применяются для восстановления водонепроницаемости грунтовых плотин при их ремонте.

В связи с этим представляет интерес опыт применения стен-завес в другой области гидротехнического строительства – инженерной защите окружающей среды при создании объектов размещения жидких промышленных отходов (хвостов, шлама, золы, шлака и др.). К ним относятся хвостохранилища, шламонакопители, золошлакоотвалы и т.п. Ограждающие сооружения этих хранилищ обычно представляют собой грунтовые дамбы с противофильтрационными устройствами. Интересно изучить, как в конструкциях ограждающих дамб хранилищ жидких отходов применяются противофильтрационные стены, и чем они отличаются от стен, применяемых в конструкциях грунтовых плотин.

Дамбы хранилищ жидких промышленных отходов представляют собой отдельный тип напорных гидротехнических сооружений. Они схожи по конструкциям и условиям работы с плотинами водохранилищ, однако имеют несколько принципиальных отличий.

Первое отличие состоит в том, что ограждающие дамбы (в отличие от плотин водохранилищ) воспринимают не только давление воды, но и давление, создаваемое весом размещаемых отходов. Следует отметить, что воды шламонакопителей и хвостохранилищ могут быть агрессивными.

Второе отличие состоит в материалах и конструкциях ограждающих дамб.

Существуют несколько видов конструкций хранилищ жидких отходов: наливные, намывные, комбинированные. Дамбы наливных хранилищ (например, шламонакопителей) по своей конструкции аналогичны грунтовым плотинам, они возводятся из карьерных грунтов и могут иметь противофильтрационные элементы. Дамбы намывных хранилищ выполняются из материала хвостов и не имеют противофильтрационных элементов. Такие дамбы испытывают силовое воздействие фильтрационного потока и их безопасность в существенной степени определяется фильтрационным режимом сооружения. Комбинированные дамбы возводятся на первом этапе как наливные, а затем как намывные.

Третье отличие связано со способом возведения сооружений. Многие дамбы постоянно наращиваются в процессе эксплуатации. Наращивание может осуществляться в сторону нижнего, верхнего бьефов или по оси. При любом способе наращивания изменяется фильтрационный режим сооружения. Но особую опасность представляет собой наиболее

распространённое наращивание в сторону верхнего бьефа – в этом случае последующий ярус дамбы опирается на недоуплотнённые хвосты, что создаёт угрозу потери несущей способности всего сооружения.

Соответственно, в конструкциях ограждающих дамб должно уделяться большое внимание противофильтрационным мероприятиям, одним из которых и может являться устройство стен-завес.

Мы задались целью составить обзор опыта применения противофильтрационных стен в ограждающих дамбах хвостохранилищ и шламонакопителей.

Методика

Для решения поставленной задачи нами было изучено большое количество научных трудов, посвященных вопросам проектирования, возведения и эксплуатации объектов размещения промышленных отходов.

Осуществлялся сбор и анализ информации по нескольким вопросам:

- Случаи аварий ограждающих дамб, вызванных негативным действием фильтрации;
- Противофильтрационные устройства в конструкциях ограждающих дамб, включающих «стены в грунте».

Однако публикаций, посвящённых опыту применения «стен в грунте» в конструкциях ограждающих дамб, известно мало [1-10].

Результаты

Аварии ограждающих дамб хранилищ промышленных отходов

Статистика свидетельствует о том, что именно фильтрация занимает главенствующее место среди причин аварий накопителей промышленных отходов. По данным [2] в 22% случаев аварии были вызваны фильтрацией.

В таблице 1 приведены сведения о крупнейших авариях, собранные в [2] из других источников. Почти в половине случаев (в 8 случаях из 18) авария была связана с фильтрацией воды через тело дамбы.

Таблица 1 – Информация об крупнейших авариях хранилищ жидких промышленных отходов

Год	Наименование (местоположение)	Высота, м	Методы наращивания	Причина аварии (количество жертв)
1928	Barahona (Чили)	61	в верховую сторону	Землетрясение (54)
1965	El Cobre (Чили)	36	в верховую сторону	Землетрясение (>300)
1972	Buffalo Creek (США)	14-18	в верховую сторону	Фильтрация (125)
1974	Bafokeng (Южная Африка)	20	в верховую сторону	Фильтрация (14)
1975	Mike Horse (США)	18	в верховую сторону	Переполнение (н.д.)
1976	Dashihe (Китай)	37	в верховую сторону	Землетрясение (н.д.)
1978	Mochikoshi №1, №2 (Япония)	28, 19	в верховую сторону	Землетрясение (1)
1978	Arcturus (Зимбабве)	25	в верховую сторону	Переполнение (1)
1979	Union Carbide (США)	43	в верховую сторону	Фильтрация (н.д.)
1985	Stava (Италия)	29,5	в верховую сторону	Фильтрация (268)
1985	Cerro Negro №4 (Чили)	40	в верховую сторону	Землетрясение (н.д.)
1988	Lixi (Китай)	40	в верховую сторону	Переполнение (20)
1991	Sullivan (Канада)	21	в верховую сторону	Фильтрация (н.д.)
1994	Tapo Canyon (США)	24	в верховую сторону	Землетрясение (н.д.)
1994	Merriespruit (ЮАР)	31	в верховую сторону	Переполнение (17)
1996	Sgurigrad (Болгария)	45	в верховую сторону	Фильтрация (107)

2010	Ajka (Венгрия)	22	в низовую сторону	Фильтрация (10)
2015	Fundão (Бразилия)	90	в верховую сторону	Фильтрация (19)

Для предотвращения негативных последствий фильтрации конструкциях дамб предусматривают дренажные и противофильтрационные устройства. Противофильтрационные устройства выполняют в теле, в основании дамб, а также по ложу хранилища.

Одним из типов применяемых противофильтрационных устройств являются «стены в грунте». Часто они применяются в составе комбинированных противофильтрационных устройств.

Примеры противофильтрационных стен в конструкциях ограждающих дамб

Примеров применения противофильтрационных стен в грунте в конструкциях дамб хвостохранилищ в технической литературе описано немного. Здесь мы собрали и проанализировали известные случаи.

Хвостохранилище Aznallcolar. В 1978 г. противофильтрационная стена была применена для создания наливного хвостохранилища Aznallcolar (Испания). Стена пересекает первичную дамбу хвостохранилища высотой 6 м и слой аллювиального песка мощностью около 5 м, достигая слоя глины [3] (рис. 1). Стена выполнена из глиноцементобетона.

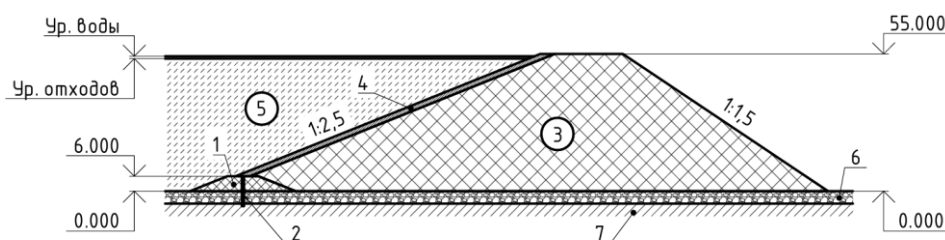


Рисунок 1 – Схема конструкции ограждающей дамбы хвостохранилища Aznallcolar (Испания)

- 1 – пионерная дамба; 2 – противофильтрационная стена; 3 – тело ограждающей дамбы из каменной наброски; 4 – глинистый экран; 5 – хвосты; 6 – аллювиальные отложения; 7 – глинистый грунт основания

Впоследствии дамба была наращена в сторону нижнего бьефа. Вторичная каменно-земляная дамба имеет противофильтрационный экран из глины (рис.1), который примыкает к стене-диафрагме. К 1998 г. высота хвостохранилища достигла 55 м. А 25 апреля 1998 г. произошло разрушение дамбы из-за сдвига в основании [3].

Хвостохранилище Diavik. В наливном хвостохранилище рудника Diavik (Канада) противофильтрационная стена была выполнена как в основании, так и в теле плотины. Дамба высотой до 24 м была возведена в 2003 г., она отделяет хвостохранилище от озера [4]. Дамба – каменно-набросная, её центральная часть отсыпана из пустой породы мелких фракций (до 50 мм), а боковые части – из более крупных фракций (рис.2). Противофильтрационная диафрагма толщиной 1,2 м выполнена из грунтоцементных свай, в скальном основании выполнена цементационная завеса. Грунтоцементные сваи получены путём смешивания грунта центральной части дамбы с цементом (методом Cutter Soil Mixing – фрезерного смешивания грунта).

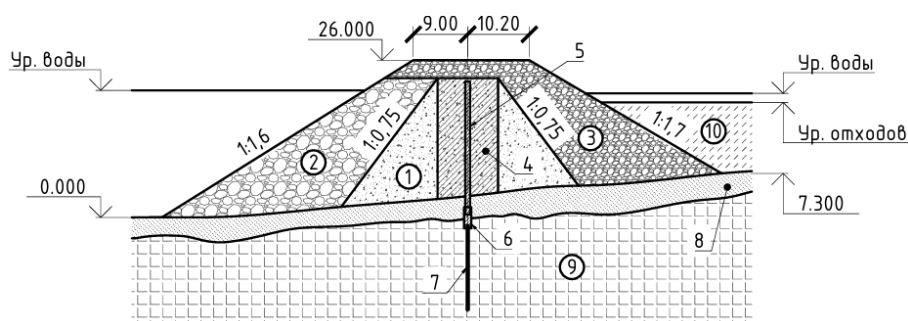


Рисунок 2 – Схема конструкции ограждающих дамб хвостохранилища рудника Diavik (Канада)

1 – центральная зона из дресвяно-щебенистого грунта; 2 – каменная наброска; 3 – щебень; 4 – зона виброуплотнения центральной зоны; 5 – противофильтрационная стена; 6 – струйная цементация грунтов; 7 – цементация трещиноватого скального основания; 8 – водопроницаемый грунт основания; 9 – трещиноватое скальное основание; 10 – хвосты

Хвостохранилище Red Dog. В хвостохранилище рудника Red Dog на Аляске (США) противофильтрационная стена была применена в дамбе одной из очередей строительства в 2016 г. Для предотвращения попадания в окружающую среду арктической зоны вредных химических веществ потребовалось полное исключение утечек воды из накопителя. В основании траншейным методом была выполнена «стена в грунте» толщиной 0,8 м, она прорезала нескальные грунты мощностью 25 м и была заглублена в скальные породы (рис.3,4) [4]. Протяжённость стены составила 1500 м, поэтому она возводилась в течение трёх летних сезонов.

В самой дамбе противофильтрационным элементом является экран из полиэтиленовой геомембраны (HDPE) толщиной 2,5 мм.

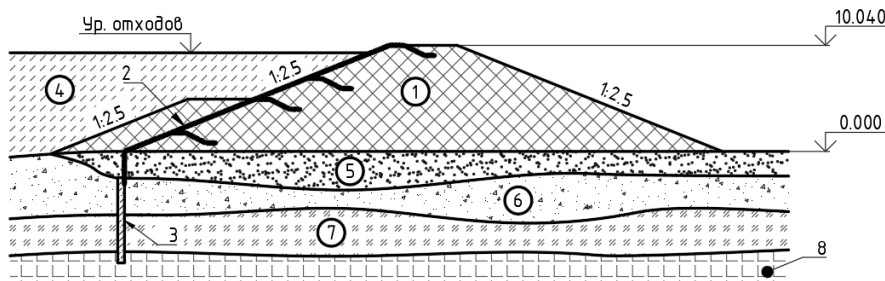


Рисунок 3 – Схема конструкции ограждающей дамбы Red Dog (США)

1 – тело дамбы; 2 – экран из геомембраны; 3 – противофильтрационная стена; 4 – хвосты; 5 – подготовка основания из уплотненного песчаного грунта; 6 – песчаный грунт основания с примесью гравия; 7 – сильновыветрелый сланец основания; 8 – сланец основания

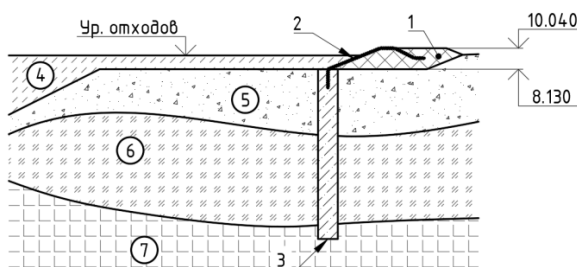


Рисунок 4 – Схема конструкции ограждающей дамбы Red Dog (США)

1 – тело дамбы; 2 – экран из геомембраны; 3 – противофильтрационная стена; 4 – хвосты; 5 – песчаный грунт основания с примесью гравия; 6 – сильновыветрелый сланец основания; 7 – сланец основания

Новым направлением применения противofильтрационных стен в конструкциях ограждающих сооружений хранилищ промышленных отходов является их использование при ликвидации выведенных из строя объектов. Примером такого объекта является хвостохранилище Sillamae в Эстонии. В советские годы оно использовалось для складирования отходов производства обогащённого урана и золы ГРЭС. В нём хранится 6,5 млн.м³ отходов [5].

Проект ликвидации хранилища Sillamae предусматривал его покрытие геомембраной для защиты от атмосферных осадков, создание дренажных и противofильтрационных устройств, а также берегозащитной дамбы на берегу Балтийского моря. Для предотвращения фильтрации воды из ложа накопителя в Балтийское море была запроектирована «стена в грунте» из глиноцементобетона. Длина стены составляет 580 м, а глубина от 12 до 18 м [5]. Проект ликвидации хранилища был реализован в 2004–2008 гг.

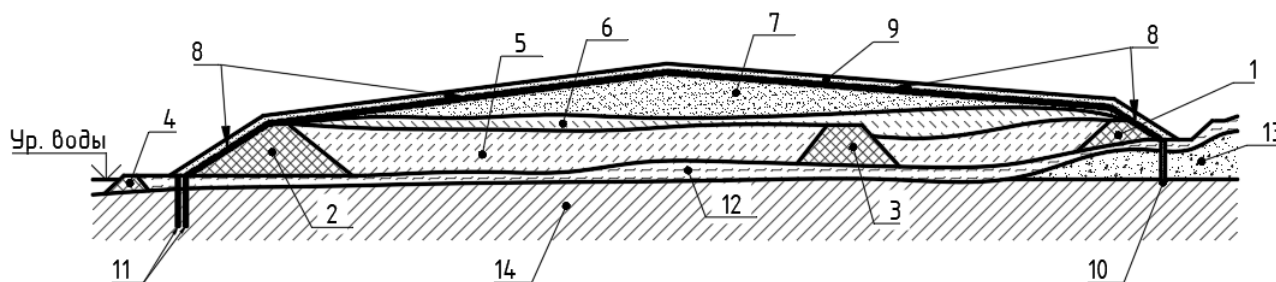


Рисунок 5 – Поперечный разрез по хвостохранилищу Sillamae (Эстония) после ликвидации
1 – ограждающая дамба со стороны берега; 2 – ограждающая дамба со стороны моря; 3 – разделительная дамба хвостохранилища; 4 – берегоохранная дамба; 5 – урановые хвосты; 6 – золошлаки; 7 – защитный/выравнивающий слой из грунта; 8 – глинистый экран; 9 – рекультивационный слой; 10 – противofильтрационная стена; 11 – свайный ростверк (усиление основания); 12 – песчано-гравийный грунт основания; 13 – песчаник основания; 14 – водоупорный слой основания из глины

Примеры применения композитных противofильтрационных стен

Следует отметить, что воды в хранилищах жидких промышленных отходов могут быть агрессивными к материалу противofильтрационных стен. По этой причине приходится применять особые конструкции стен-завес.

В [6] описан пример применения композитной противofильтрационной стены у подножия дамбы хвостохранилища в Аризоне (США). Описанная дамба хвостохранилища высотой 30,5 м предназначена для хранения отходов медных рудников. Фильтрующие воды имели высокое содержание сульфата меди и низкий водородный показатель ($\text{pH} < 2$). По этой причине было принято решение устраивать композитную стенку, с использованием полиэтилена, который обладает стойкостью к агрессивным водам.

Композитная противofильтрационная стенка была выполнена в 1996 г. Она выполнялась на глубину до 18,3 м с врезкой в водонепроницаемый слой грунтов основания минимум на 1 м. В траншею, заполненную бентонитом, для дополнительной противofильтрационной защиты устанавливались полиэтиленовые панели шириной 2,45 м (рис.6). Толщина панелей составила 2,5 мм, для их надёжного закрепления использовались специальные замки. Стыки также герметизировались резиновым шнуром.

В [7] описан случай применения композитной противofильтрационной стены в дамбе Cross Delta хвостохранилища месторождения Big Island в Вайоминге (США). В нём хранятся отходы добычи минерала троны, сырьё для производства соды.

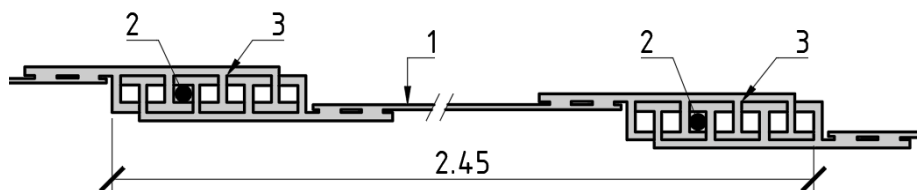


Рисунок 6 – Схема крепления между собой полиэтиленовых панелей внутри стены
1 – лист мембраны HDPE толщиной 2,5 мм; 2 – резиновый уплотняющий шнур; 3 – замок

Для снижения фильтрации потребовалось возвести противофильтрационную завесу непосредственно в чаше хвостохранилища, в складываемых отходах. Сложность задачи заключалась в длине создаваемой завесы (1082 м). Было принято решение создавать завесу методом смешивания, из смеси разрабатываемого материала (хвосты) и цемента. Получаемая смесь приобретала прочность на сжатие примерно 0,25 МПа. Толщина стены составила не менее 45 см, глубина – до 15,5 м.

Чтобы обеспечить требуемую водопроницаемость ($1,0 \cdot 10^{-6}$ см/с) стена-завеса была выполнена композитной (рис.7). Ещё до затвердевания грунтоцементной смеси (не менее 18 часов) в стену с помощью специальной обоймы погружались виниловые листы.

Стена-завеса была возведена в 2015 г. Мониторинг фильтрационного режима выполненной стены подтвердил её герметичность.

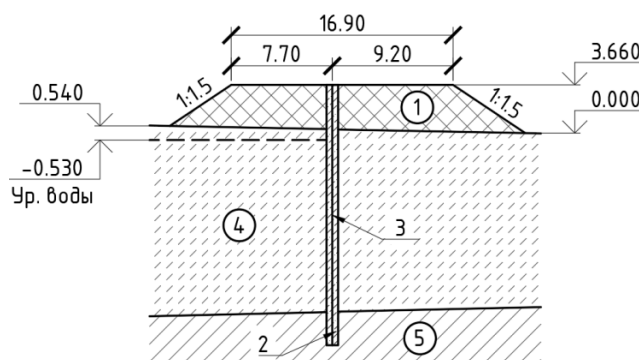


Рисунок 7 – Схема конструкции ограждающей дамбы хвостохранилища месторождения Big Island Mine (США)

1 – тело ограждающей дамбы из смеси грунта и хвостов; 2 – противофильтрационная стена из грунтоцементной смеси; 3 – виниловая пластина; 4 – хвосты; 5 – глинистый грунт основания

Планы применения противофильтрационных стен в ограждающих дамбах

Есть примеры планов применения «стен в грунте» в основании дамб новых дамб. Одним таким примером является проект хвостохранилища «Сухой Лог».

Планируется также дальнейшее применение противофильтрационных стен для ремонта или реконструкции ограждающих сооружений. Это связано с тем, что в некоторых условиях оно является единственным рациональным конструктивным решением. Примерами являются дамба Удоканского ГМК и золошлакоотвалов Аксуской ГРЭС.

Хвостохранилище «Сухой Лог» планируется к созданию в Иркутской области для разработки золотоносного месторождения [8].

Строительство каменно-набросной дамбы предполагается в несколько очередей, с наращиванием в сторону нижнего бьефа. Она будет относиться к I классу ответственности сооружений, дамба четвёртой очереди будет достигать более 90 м в высоту (рис.8). В условиях наличия высокого напора для обеспечения фильтрационной прочности грунтов

основания потребуется создание противофильтрационной стены из буросекующихся свай. Глубина свай составит около 20 м, диаметр свай – 1,0 м. Эта завеса будет сопрягаться с экраном.

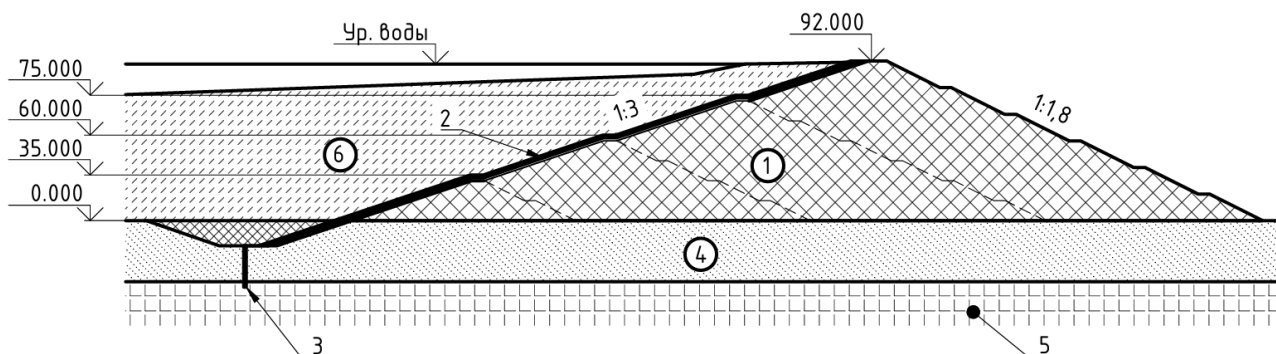


Рисунок 8 – Схема ограждающей дамбы хвостохранилища «Сухой Лог»

- 1 – тело ограждающей дамбы; 2 – противофильтрационный экран из геомембраны;
3 – противофильтрационная стена; 4 – нескальные грунты основания; 5 – скальные породы;
6 – хвосты

Хвостохранилище Удоканского горнометаллургического комбината расположено в Забайкальском крае. В первичной Западной дамбе Удоканского ГМК противофильтрационная стена потребовалась для выполнения ремонтно-восстановительных работ. Западная дамба имеет высоту 39,5 м, длину по гребню 184 м и относится ко II классу ответственности [9]. Она была запроектирована каменно-набросной с экраном из гидромата. Профиль дамбы принят очень пологим, т.к. она располагается на мощной толще (глубиной до 30 м) мёрзлых дисперсных грунтов (валунно-галечниковые, щебенистые грунты с глинистым заполнителем и крупными включениями). Верховой откос имеет уклон 1:3, низовой – 1:5 (рис.9).

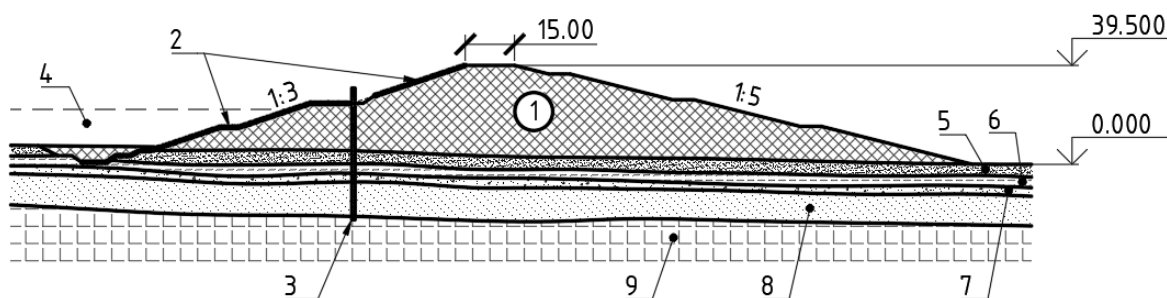


Рисунок 9 – Конструкция западной первичной дамбы хвостохранилища Удоканского горнометаллургического комбината

- 1 – тело дамбы из каменной наброски; 2 – экран из геомембраны, уложенный по верховому откосу; 3 – противофильтрационная стена; 4 – ложе хвостохранилища; 5, 6, 7, 8 – водопроницаемые слои грунтов основания; 9 – водопор

Гидромат в конструкции дамбы был предусмотрен для защиты её мёрзлой упорной призмы от растепления при первоначальном наполнении, а также для защиты от проникновения в поры каменной наброски. В дальнейшем планировалось наращивание дамбы и её преобразование в комбинированную.

Возведение первичной Западной дамбы выполнялось с декабря 2019 г. по май 2020 г. При первичном заполнении хвостохранилища в мае-июне 2020 г была зафиксирована резкая сработка уровня. При визуальном обследовании была обнаружена утечка воды через нескальное основание дамбы, в котором сформировалась талая зона [9].

Для ремонта принято решение о создании в основании противофильтрационной стены из буросекущихся свай диаметром 1,2 м, расположенных с шагом 0,96 м. Стена будет расположена с верховой стороны дамбы и пересекать тело дамбы и слой нескального основания, заглубляя её в скалу (рис.10). Её глубина составит 57 м, а длина – 175 м. Стена-завеса будет создана из буросекущихся свай диаметром 1,2 м, расположенных с шагом 0,96 м. В качестве материала стены планируется использовать глиноцементобетон.

Дамбы золошлакоотвала Аксуской ГРЭС. Планируется применение противофильтрационной стены при реконструкции дамб золошлакоотвала Аксуской ГРЭС в Казахстане [10]. Реконструкция заключается в наращивании дамбы секции 1 и строительстве новых секций.

Секцию 1 предполагается наращивать на два яруса. Каждый из ярусов имеет высоту 7 м (рис.11). Наращивание дамбы требует усиления противофильтрационной защиты. В верхних ярусах противофильтрационным элементом будет являться экран из геомембраны, но в нижнем ярусе единственным способом является устройство противофильтрационной стены-завесы. Она пересечёт нижний ярус дамбы (высотой 8 м) и проницаемый слой нескального основания. Глубина завесы от гребня дамбы составит 16 м, а длина в плане – около 9 км. Стену-завесу планируется выполнить из бентонитовой глины, её толщина – 0,5 м. Она будет смыкаться с экраном из геомембраны, образуя целостный герметичный контур.

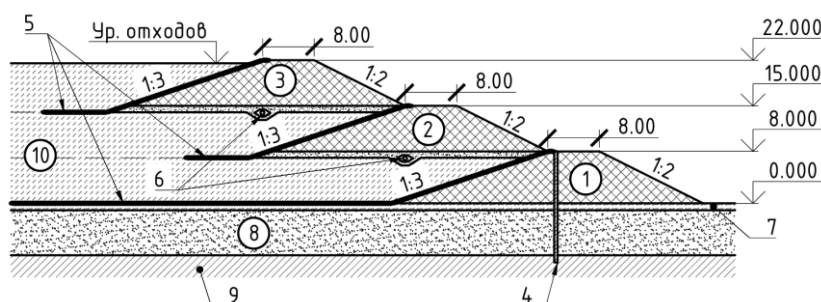


Рисунок 11 – Конструкция дамбы Аксуской ГРЭС после наращивания

1 – существующая дамба после ремонтно-восстановительных работ; 2 – дамба второй очереди; 3 – дамба третьей очереди; 4 – противофильтрационная стена; 5 – экран из геомембраны; 6 – трубчатый дренаж; 7 – супесь основания; 8 – песок крупный в основании; 9 – глина основания; 10 – золошлаки

В новой секции 2Б золошлакоотвала Аксуской ГРЭС планируется строительство дамбы с комбинированным противофильтрационным устройством (экран из текстурированной геомембраны и противофильтрационная стена) (рис.12). Сопряжение геомембраны со стеной предполагается осуществлять при производстве работ погружением конца текстурированной геомембраны в глиноцементный раствор. Длина стены составит примерно 6,25 км. Её устройство позволит отказаться от покрытия ложа золошлакоотвала.

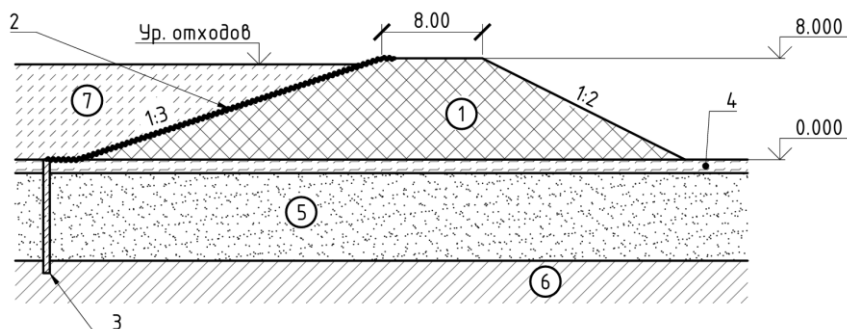


Рисунок 12 – Разрез по дамбе подсекции 2Б Аксуской электрической станции

1 – тело ограждающей дамбы; 2 – экран из геомембраны; 3 – противофильтрационная стена; 4 – супесь основания; 5 – песок крупный в основании; 6 – глина основания; 7 – золошлаки

Выводы

1. Противофильтрационные «стены в грунте» редко применяются в конструкциях хранилищ жидких отходов промышленности, однако существуют случаи, когда их устройство является единственным рациональным решением. Это случай, когда необходимо исключить фильтрацию через проницаемый слой нескального основания, не изолируя ложе хранилища. Кроме того, противофильтрационные стены применяют как способ восстановления водонепроницаемости ограждающих дамб при ремонте и реконструкции, для обеспечения герметичности выведенных из строя объектов складирования отходов.

2. Противофильтрационные стены применяются как в составе комбинированных противофильтрационных устройств ограждающих дамб хранилищ жидких отходов промышленности, так и как единственное противофильтрационное устройство.

3. Для устройства противофильтрационных стен ограждающих дамб хвостохранилищ и шламонакопителей применяются разные технологии: способ «стена в грунте», способ буросекущих свай, а также способ смешивания цемента с грунтом. Как правило, для устройства стен используются бентонитосодержащие материалы.

4. В дамбах хранилищ жидких отходов применяют особые конструкции противофильтрационных стен, которые не используют в плотинах водохранилищ. Это композитные стены, внутри которых установлены панели из пластика для дополнительной противофильтрационной защиты. Необходимость применения полимерных материалов обусловлена агрессивностью вод, фильтрующих из хранилищ, и/или высокими требованиями к водонепроницаемости стены.

5. По условиям работы противофильтрационные стены хранилищ жидких отходов отличаются от стен плотин водохранилищ, однако их проектные решения принимаются без учёта этого фактора. Условия работы противофильтрационных стен хвостохранилищ и шламонакопителей требуют дополнительного изучения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ганичев И.А., Мещеряков А.Н., Хейфец В.Б. Новые способы устройства противофильтрационных завес // Гидротехническое строительство. 1961. №2. С.14–18.
2. Lyu Z., Chai J., Xu Z., Qin Y., Cao J. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History // Advances in Civil Engineering. 2019. 4159306.
3. Gens A., Alonso E.E., Aznalco'llar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism // Géotechnique. 2006. No. 3. P. 165–183.
4. Schwank S. Cut-off systems for dikes and tailings dams in mining. 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. P. 429–433.
5. Barnekow U., Jakubick A., Paul M., Jaaksoo R., Kaasik T. Stabilization and decommissioning of the Sillamae radioactive tailings pond, Estonia. 10th International Conference on Tailings and Mine Waste, Vail, Colorado. 2003. P. 487–494.
6. Owaidat L.M., Day S.R. Installation of a Composite Slurry Wall to Contain Mine Tailings. Fifth International Conference «Tailings and Mine Waste '98» (Fort Collins, Colorado, USA, 26-28 January 1998). P. 421–429.
7. Conteras I., Bryant G.K. Operational Improvements through Installation of Seepage Cutoff Wall using Soil Mixing // Water Management. 2018. P.861–871.
8. Петраш Н.Г., Карпенко И.А., Карпухина М.В. Экономическая оценка месторождения Сухой Лог в современных условиях недропользования // Руды и металлы. 2008. №2. С.89–104.

9. Argal E. S. Control of Filtration at the Base of the Western Dam of the Tailings Dump of Udokan Mining and Metallurgical Works // Power Technology and Engineering. 2024. Vol.57. No.6. P.858–863.

10. Шайтанов А.М., Талалаев Н.С. Применение комбинированного противотрассирующего элемента в составе ограждающей дамбы золошлакоотвала Аксуской электрической станции // Гидротехническое строительство. 2024. №12. С.8–12.

REFERENCES

1. Ganichev I.A., Meshheryakov A.N., Xejfecz V.B. *Novye sposoby ustrojstva protivofiltracionnyx zaves* [New methods of constructing anti-seepage curtains]. *Gidrotexnicheskoe stroitel'stvo*. 1961. No. 2, pp.14–18.

2. Lyu Z., Chai J., Xu Z., Qin Y., Cao J. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History. *Advances in Civil Engineering*. 2019. 4159306.

3. Gens A., Alonso E.E., Aznalco'llar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism. *Géotechnique*. 2006. No. 3, pp.165–183.

4. Schwank S. Cut-off systems for dikes and tailings dams in mining. 17th African Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019, pp.429–433.

5. Barnekow U., Jakubick A., Paul M., Jaaksoo R., Kaasik T. Stabilization and decommissioning of the Sillamae radioactive tailings pond, Estonia. 10th International Conference on Tailings and Mine Waste, Vail, Colorado. 2003, pp.487–494.

6. Owaidat L.M., Day S.R. Installation of a Composite Slurry Wall to Contain Mine Tailings. Fifth International Conference «Tailings and Mine Waste '98» (Fort Collins, Colorado, USA, 26-28 January 1998), pp. 421–429.

7. Conteras I., Bryant G.K. Operational Improvements through Installation of Seepage Cutoff Wall using Soil Mixing. *Water Management*. 2018, pp.861–871.

8. Petrash N.G., Karpenko I.A., Karpuxina M.V. *Ekonomicheskaya ocenka mestorozhdeniya Suxoj Log v sovremennyx usloviyax nedropolzovaniya* [Economic assessment of the Sukhoi Log deposit in modern conditions of subsoil use]. *Rudy i metally*. 2008. No. 2, pp.89–104.

9. Argal E. S. Control of Filtration at the Base of the Western Dam of the Tailings Dump of Udokan Mining and Metallurgical Works. *Power Technology and Engineering*. 2024. Vol. 57. No. 6, pp.858–863.

10. Shajtanov A.M., Talalaev N.S. *Primenenie kombinirovannogo protivofiltracionnogo elementa v sostave ograzhdayushhej damby zoloshlakootvala Aksuskoj elektricheskoy stancii* [Application of a combined anti-seepage element in the composition of the protective dam of the ash dump of the Aksu power plant]. *Gidrotexnicheskoe stroitel'stvo*. 2024. No. 12, pp.8–12.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Саинов Михаил Петрович – доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14, стр.1, e-mail: SainovMP@mpei.ru)	Sainov Mikhail Petrovich – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (111250, Russia, Moscow, 14-1, Krasnokazarmennaya street, e-mail: SainovMP@mpei.ru)
Талалаев Никита Сергеевич – аспирант, Московский государственный строительный университет (Национальный исследовательский университет) (129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, e-mail: talalaevnicita@yandex.ru).	Talalaev Nikita Sergeevich – postgraduate student, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (129337, Russia, Moscow, 26, Yaroslavl'skoe shosse, e-mail: talalaevnicita@yandex.ru)



Статья поступила в редакцию 19.02.2025; одобрена после рецензирования 04.03.2025, принята к публикации 02.04.2025.

The article was submitted 19.02.2025; approved after reviewing 04.03.2025; accepted for publication 02.04.2025.



Научно-производственная статья
УДК 693.542:002.5:658.011.47

ПОРТАТИВНЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ БЕТОНОСМЕСИТЕЛИ БЫТОВОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА БАЗЕ ЕДИНОЙ МОДУЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ

В.В. Минин^{1,2*}, Г.А. Кузнецов¹, А.Д. Мальков¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² Российская инженерная академия, Москва, Россия

* E-mail: vminin@rambler.ru

Аннотация. В России вырос спрос на технологическое оборудование, применяемое для перемешивания различных материалов при строительстве, производстве ремонтных работ, а также при восстановлении разрушенных в ходе боевых действий частных домов, зданий и сооружений. В статье представлен модельный ряд портативных гравитационных бетоносмесителей, созданных на базе единой модульной платформы. Разработаны оригинальные компоновки 7 моделей с объёмом барабана 70, 64, 60, 52 и 38 литров. Преимущества модульного проектирования позволили выработать конструктивные решения по улучшению мощностных, массогабаритных, технологических, эксплуатационных и экономических показателей бетоносмесителей бытового назначения за счет применения новых конструкционных материалов, нетрадиционных компоновок с альтернативными электромеханическими приводами. Экспериментальными исследованиями доказаны конкурентные преимущества, эффективность производства и эксплуатации портативных гравитационных бетоносмесителей. Это позволяет не только провести импортозамещение бетоносмесителей бытового назначения, но и в сочетании с имеющейся патентной защитой создавать экспортно-ориентированную продукцию на базе единой модульной платформы.

Ключевые слова: портативный гравитационный бетоносмеситель; бытовой гравитационный бетоносмеситель; единая модульная платформа; модельный ряд; импортозамещение.

Для цитирования: Минин В.В., Кузнецов Г.А., Мальков А.Д. Портативные гравитационные бетоносмесители бытового назначения на базе единой модульной платформы // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2025. Т. 11. № 2. С. 79-88.

Scientific-production article

PORTABLE GRAVITY CONCRETE MIXERS FOR DOMESTIC PURPOSES BASED ON A SINGLE MODULAR PLATFORM

V.V. Minin^{1,2*}, G.A. Kuznetsov¹, A.D. Malkov¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² Russian Engineering Academy, Moscow, Russia

* E-mail: vminin@rambler.ru

Abstract. In Russia, the demand for technological equipment used to mix various materials in the construction, repair work, as well as in the restoration of private houses, buildings and structures destroyed during the hostilities has grown. The article presents a range of portable gravitational concrete mixers created on the basis of a single modular platform. Original layouts of 7 models with a drum volume of 70, 64, 60, 52 and 38 liters have been developed. The advantages

of modular design made it possible to develop design solutions to improve the power, weight and size, technological, operational and economic indicators of domestic concrete mixers through the use of new structural materials, non-traditional layouts with alternative electromechanical drives. Experimental studies have proven competitive advantages, production efficiency and operation of portable gravitational concrete mixers. This allows not only to carry out import substitution of domestic concrete mixers, but also, in combination with the existing patent protection, to create export-oriented products on the basis of a single modular platform.

Keywords: *portable gravitational concrete mixer; domestic gravitational concrete mixer; single modular platform; model range; import substitution.*

For citation: Minin V.V., Kuznetsov G.A., Malkov A.D. Portable gravitational concrete mixers for domestic purposes based on a single modular platform // *Journal of Science and Education of the North-West Russia*. 2025. Vol. 11. No. 2, pp. 79-88.

Введение

В России перед машиностроителями поставлена задача создания технологического оборудования, обеспечивающего механизацию технологических процессов в различных отраслях промышленности. Перемешивание – один из самых распространенных технологических процессов, применяется для приготовления различных смесей и других подвижных материалов. Российская Инженерная Академия проводит научные исследования по совершенствованию техники для смешивания дисперсных материалов различного отраслевого назначения. Развитие Северных территорий, Сибири и Дальнего Востока невозможно без увеличения темпов индивидуального жилищного строительства.

Наиболее прогрессивными перемешивающими машинами являются циклические гравитационные бетоносмесители. Они массово выпускаются, обладают высокими удельными показателями и совершенствуются быстрыми темпами. Опубликовано большое количество результатов исследований, направленных на повышение эффективности использования отечественных и зарубежных бетоносмесителей [1-4]. Тогда как по бытовым бетоносмесителям их гораздо меньше. По классификации [5], циклические гравитационные бетоносмесители в зависимости от назначения подразделяются на бытовые (объем барабана мене 100 л), профессиональные (объем барабана от 100 до 250 л) и промышленные (объем барабана более 250 л).

В настоящее время в России наблюдается стремительное насыщение рынка строительного оборудования бытовыми и профессиональными гравитационными бетоносмесителями различных типоразмеров отечественного и китайского производства. Традиционная для бетоносмесителя такого типа компоновка включает Н-образную раму, опирающуюся на два колеса, и неподвижную опору, смесительный барабан, электромеханический привод, штурвал или ручку для опрокидывания барабана. Электромеханический привод состоит из электродвигателя, ременной передачи и конической зубчатой передачи.

Такую компоновку имеют отечественные бетоносмесители Лебедянского завода строительно-отделочных машин (Строймаш), однако данный завод не производит бытовых гравитационных бетоносмесителей. Считается, что в России экономически нецелесообразно изготавливать гравитационные бетоносмесители с объемом барабана менее 100 л. Хотя бетоносмесители с малым объемом барабана быстрее и качественнее перемешивают смешиваемые материалы, кроме того они легче, компактнее.

Анализ российского рынка строительного оборудования показал, что на нём присутствуют бытовые гравитационные бетоносмесители с малым объемом барабана китайского производства под торговыми марками «Парма», «Вихрь», «Калибр», «Варяг», «Сибртех», «Кратон», Forza, Tor, Ferrua, Prorab, Tsunami, Redverg и др. Данные бетоносмесители выпускаются с объемом барабана 46, 63, 65, 70 л. Существующая компоновка традиционных бытовых бетоносмесителей имеет ряд существенных

недостатков. В кинематической цепи бетоносмесителя используется открытая коническая передача, подвергающаяся абразивному износу продуктами перемешивания. Зубчатое колесо конической передачи имеет большие зазоры в зацеплении. Оно изготавливается выдавливанием впадин зубьев или прорезанием пазов под зубья на ободе стального барабана. Постоянно требуется регулировка зазора в зубчатом зацеплении. Большой зазор вызывает повышенный шум в работе до 97 дБ, малый зазор при попадании абразивного материала в зону контакта зубьев приводит к заклиниванию открытой передачи и выходу из строя электродвигателя и ременной передачи. Открытая коническая передача требует повышенной мощности электродвигателя для прокручивания барабана. Кроме того, бетоносмеситель имеет большие массу и габариты, высокую трудоемкость изготовления. При транспортировке бетоносмесителя требуется легковой автомобиль-фургон или грузовой прицеп к легковому автомобилю.

Современные бытовые бетоносмесители должны обладать следующими конкурентными преимуществами:

- меньшей стоимостью изготовления;
- простой технологией изготовления;
- меньшей массой и габаритами;
- меньшим энергопотреблением;
- меньшим шумом в работе;
- простотой эксплуатации, обслуживания и ремонта.

Для насыщения отечественного рынка и обеспечения строительной отрасли современными бетоносмесителями необходимо создать модельный ряд бетоносмесителей с широким диапазоном барабанов различного объема.

По той же классификации [5] бытовые бетоносмесители в зависимости от объема барабана подразделяются на бетоносмесители особо малого класса (объем барабана менее 60 л) и малого класса (объем барабана от 60 до 100 л). Разделение бетоносмесителей на классы позволило, с одной стороны, сделать их более конкурентоспособными, а с другой стороны – ближе к потребителю.

В данной статье представлены исследования по созданию модельного ряда портативных бетоносмесителей с малым объемом барабана на базе единой модульной платформы (ЕМП), отличающихся высокими конструктивными, технологическими и эксплуатационными параметрами.

Портативные гравитационные бетоносмесители бытового назначения

Портативные бетоносмесители предназначены для приготовления бетонных и растворных смесей с крупностью заполнителя до 30 мм, а также для перемешивания сыпучих материалов. Область применения портативных бетоносмесителей бытового назначения – индивидуальное жилищное строительство, а также строительство гаражей, дачных построек, заливка фундаментов, изготовление тротуарных плиток и др. Физические лица, строительные организации, жилищно-эксплуатационные и дорожно-ремонтные предприятия могут быть потребителями бетоносмесителей.

В Сибирском федеральном университете работают над созданием модельного ряда портативных циклических гравитационных бетоносмесителей малого и особо малого класса на базе ЕМП с применением инновационного проектирования [6], а также с применением методов поиска новых технических решений, включая функционально-стоимостный анализ [7]. ЕМП создается с использованием блочно-модульного принципа проектирования с максимальным агрегатированием изделия и высокой унификацией узлов и деталей отечественного производства. Преимущество блочно-модульного принципа проектирования заключается в следующем: отработав один модуль бетоносмесителя, можно создать модельный ряд, изготавливая бетоносмесители в различном исполнении. При этом каждый модуль представляет группу сборочных единиц и может быть заменен в условиях

эксплуатации (при неисправности, выработке ресурса или модификации) без каких-либо дополнительных работ. Это повышает эксплуатационную и ремонтную технологичность бетоносмесителя.

Единая модульная платформа бетоносмесителя, по пат. РФ 154403¹ [8], состоит из 4 модулей: смесительный барабан, расположенный под углом к горизонтальной плоскости; рама, имеющая пару ручек и опирающаяся на четыре пяты; электромеханический привод, закрепленный на раме и состоящий из электродвигателя и редуктора приводящего в движение смесительный барабан. ЕМП представляет собой портативное устройство со смесительным узлом, у которого выгрузка смеси осуществляется опрокидыванием смесительного барабана вперед за счет поднятия одной стороны рамы за пару ручек.

В качестве аналогов для проведения сравнительного анализа конструкционных, технологических и эксплуатационных параметров были взяты бытовые гравитационные бетоносмесители китайского производства, технические параметры которых представлены в табл.1.

Таблица 1 – Технические параметры бетоносмесителей бытового назначения китайского производства

Параметры	Марка бетоносмесителя			
	Skiper CM70 ²	Кратон BeeTone70 ³	Redverg CM63 ⁴	Tor 46 ⁵
Объем барабана, л	70	65	63	46
Потребляемая мощность, Вт	375	220	250	150
Длина, м	1,1	1,1	1,09	1,07
Ширина, м	0,55	0,55	0,55	0,51
Высота, м	0,935	0,935	0,91	0,885
Масса, кг	27	28,5	25	22
Габаритный объем, м ³	0,566	0,566	0,548	0,483

Барабаны бетоносмесителей китайского производства изготавливаются из стали штамповкой. Верхняя конусная часть барабана выполняется толщиной 1 мм, нижняя цилиндрическая часть барабана – 1,5 мм. При этом коническое зубчатое колесо выполнено в виде прорезей на ободе барабана. Технологический процесс изготовления барабанов очень трудоёмкий и энергозатратный. Стальной барабан имеет большую массу от 10 до 12 кг, что составляет примерно половину массы бетоносмесителя.

Технические параметры 7 моделей портативных гравитационных бетоносмесителей малого и особо малого класса с объемом барабана 70, 64, 60, 52 и 38 л, созданных на базе ЕМП, представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Технические параметры портативных бетоносмесителей малого класса

Параметры	Марка бетоносмесителя		
	ПБС70АЦР	ПБС64АЦР	ПБС60АЦР
Объем барабана, л	70	64	60

¹ Патент 154403 РФ МПК В 28 С 5/20. Гравитационный бетоносмеситель / Г.А. Кузнецов, 2015, Бюл. №23.

² Бетоносмеситель Skiper CM70. [Электронный ресурс]: URL: <https://vseinstrumenti.ru/product/> (дата обращения 20.04.2025).

³ Бетоносмеситель Кратон BeeTone 70. [Электронный ресурс]. URL: <https://kraton.ru/catalog/> (дата обращения 20.04.2025).

⁴ Бетоносмеситель Redverg RD CM 63L. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.220-volt.ru/catalog/> (дата обращения 20.04.2025).

⁵ Бетоносмеситель TOR 46. [Электронный ресурс]. URL: <https://gts-spb.ru/products/> (дата обращения 20.04.2025).

Потребляемая мощность, Вт	100	90	85
Длина, м	0,77	0,67	0,735
Ширина, м	0,5	0,5	0,48
Высота, м	0,68	0,57	0,63
Масса, кг	10,5	10	10
Габаритный объём, м ³	0,26	0,193	0,222
Количество деталей	17	17	17
Количество покупных изделий	14	14	14

Таблица 3 – Технические параметры портативных бетоносмесителей особо малого класса

Параметры	Марка бетоносмесителя			
	ПБС52АЦС	ПБС52АЧ	ПБС52ВЧ	ПБС38ВЧ
Объём барабана, л	52	52	52	38
Потребляемая мощность, Вт	65	70	70	50
Ток / Напряжение, V	Переменный / 220		Постоянный / 12	
Тип электродвигателя	Асинхронный		Коллекторный	
Тип редуктора	Цилиндрический соосный	Червячный		
Длина, м	0,655	0,595	0,6	0,535
Ширина, м	0,50	0,50	0,50	0,45
Высота, м	0,58	0,57	0,58	0,51
Масса, кг	12,5	10	7,5	6
Габаритный объём, м³	0,19	0,17	0,174	0,123
Количество деталей	19	14	16	12
Количество покупных изделий	14	4	4	6

При создании портативных гравитационных бетоносмесителей применялись пластмассовые барабаны. При изготовлении таких барабанов использовались тазы объёмом 19, 26, 30, 32 и 40 литров, широко применяемые в строительстве при перемешивании бетонных и растворных смесей. Они выполнены из полиамида толщиной от 2 до 2,6 мм. Тазы широким основанием фланцуются друг к другу, а со стороны горловины в днище таза фрезеруется отверстие для выгрузки готовой смеси. Барабан весит от 2 до 3 кг в зависимости от модели бетоносмесителя.

Конструкции предложенных пластмассовых смесительных барабанов портативных бетоносмесителей отличаются большим разнообразием форм и размеров. Соотношение продольных и поперечных размеров барабана в решающей степени определяет технологическую характеристику бетоносмесителя. Так, при примерно одинаковом диаметре барабана, удлиненный барабан с объёмом 60 л обладает большей вместимостью перемешиваемой смеси, чем укороченный барабан с объёмом 64 л. При этом последний имеет меньшие массогабаритные характеристики.

Применение пластмассовых барабанов позволило уменьшить от 4 до 5 раз массу барабана и от 8 до 10 раз его стоимость, а также упростить технологию изготовления по сравнению со стальным барабаном. Преимущество данных барабанов заключается в том, что тазы различных объёмов массово выпускаются отечественной промышленностью. А также в случае износа или поломки барабана возможна его быстрая замена. В связи с этим, при производстве барабана замена металла пластмассой актуальна.

Рама портативных бетоносмесителей малого и особо малого класса представляет собой две продольные балки, соединённые с двумя траверсами. Изготавливается рама из уголка размером 25х25 мм или квадратной трубы размером 20 мм. Масса рамы составляет от 1,5 до 3 кг в зависимости от модели бетоносмесителя, что в 3-4 раза меньше, чем у

бетоносмесителей китайского производства. При изготовлении рамы не требуется сварочных работ, что упрощает технологию и уменьшает себестоимость изготовления.

Основным двигателем в электромеханических приводах бетоносмесителей малого класса является асинхронный электродвигатель переменного тока напряжением 220 V. Условия проведения и результаты экспериментов представлены в работе [5]. Экспериментальными исследованиями определена потребляемая мощность двигателя от 85 до 100 Вт в зависимости от нагрузки. Преимущество применяемых двигателей: закрытое исполнение, малая масса, массово выпускаются отечественной промышленностью.

В гравитационных бетоносмесителях используются различные виды приводов [8]. В исследуемых портативных гравитационных бетоносмесителях малого класса в качестве механической передачи применяется двухступенчатый цилиндрический редуктор, выполненный в двух вариантах: рядный и соосный. Преимущество данных редукторов: закрытое исполнение, большой КПД, малый шум и масса, компактность.

В электромеханических приводах бетоносмесителей особо малого класса применяется мотор-редуктор, имеющий коллекторный электродвигатель постоянного тока напряжением 12 V с возбуждением постоянными магнитами и металлополимерную червячную передачу. Экспериментальными исследованиями определена потребляемая мощность мотор-редуктора от 50 до 70 Вт в зависимости от нагрузки [5]. Преимущество мотор-редуктора: закрытое исполнение, малый шум и масса, компактность, электробезопасность, массово выпускаются отечественной промышленностью. Применение червячного мотор-редуктора в сочетании с пластмассовым барабаном позволило уменьшить шум в работе бетоносмесителя до 50-55 дБ. Приведенные выше механические передачи имеют повышенные надёжность и ресурс работы в связи с тем, что являются закрытыми и смазываемыми.

Следует отметить, что в результате проведенных экспериментальных исследований выявлена избыточная мощность используемых для привода бетоносмесителей электродвигателей. В совокупности с применением в приводах закрытых редукторов это позволило уменьшить потребляемую мощность электродвигателей от 2 до 3 раз по сравнению с бетоносмесителями китайского производства и применить двигатели меньшей номинальной мощности, массы и стоимости.

На рис.1-3 представлены портативные бетоносмесители малого и особо малого класса с объёмом барабана 70, 60, 52 и 38 л, созданные на базе ЕМП в различном исполнении. Опытные образцы бетоносмесителей изготовлены канд.техн. наук Кузнецовым Г.А.



а



б

Рисунок 1 - Портативные бетоносмесители малого класса с электродвигателем напряжением 220 V, цилиндрическим двухступенчатым рядным редуктором: а – марка ПБС70АЦР с объёмом барабана 70 л; б – марка ПБС60АЦР с объёмом барабана 60 л

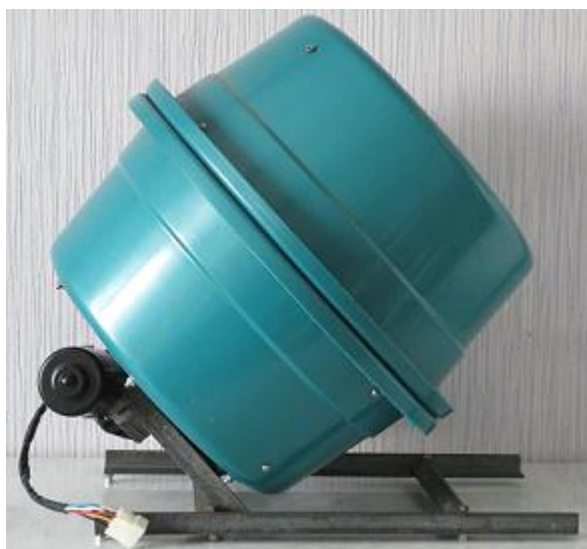


а



б

Рисунок 2 - Портативные бетономесители особо малого класса с электродвигателем напряжением 220 V, объёмом барабана 52 л: а – марка ПБС52АЦС с цилиндрическим двухступенчатым соосным редуктором; б – марка ПБС52АЧ с червячным редуктором



а



б

Рисунок 3 - Портативные бетономесители особо малого класса с электродвигателем напряжением 12 V, червячным редуктором: а – марка ПБС52ВЧ с объёмом барабана 52 л; б – марка ПБС38ВЧ с объёмом барабана 38 л

На простоту конструкции, трудоёмкость и себестоимость изготовления бетономесителя влияет количество изготавливаемых деталей и покупных изделий. Первых должно быть меньше, а вторых больше. У бетономесителя особо малого класса китайского производства марки Тог 46 количество применяемых деталей составляет 60 штук, а количество покупных изделий – 7 штук. В представленном модельном ряду портативных бетономесителей малого и особо малого класса количество изготавливаемых деталей составляет от 12 до 19 штук, количество покупных изделий – от 3 до 19 штук в зависимости от марки бетономесителя. В конструкциях бетономесителей количество изготавливаемых деталей уменьшилось от 3 до 5 раз, а покупных изделий увеличилось до 3 раз в зависимости от модели бетономесителя.

На трудоёмкость и себестоимость изготовления также влияют массогабаритные параметры бетоносмесителя. Чем легче и меньше изделие, тем оно дешевле. У представленных бытовых бетоносмесителей китайского производства масса и габаритный объём изменяются незначительно от 22 до 28,5 кг и от 0,483 до 0,566 м³ соответственно. У разработанных портативных бетоносмесителей масса и габаритный объём значительно меньше и изменяются в больших пределах от 6 до 12,5 кг и от 0,123 до 0,26 м³ соответственно. В этих конструкциях бетоносмесителей масса и габаритный объём уменьшились от 2 до 4 раз в зависимости от модели бетоносмесителя.

Созданные портативные бетоносмесители имеют меньшее количество деталей, технологичны и дешевы в изготовлении, надёжны и просты в эксплуатации. Применение в конструкции массово выпускаемых деталей и узлов позволило уменьшить стоимость изготовления бетоносмесителей.

Представленный модельный ряд портативных гравитационных бетоносмесителей бытового назначения помимо выше перечисленных конкурентных преимуществ обладает дополнительными конкурентными преимуществами:

- портативность – переносится одним человеком;
- транспортабельность – перевозится в легковом автомобиле;
- компактность при хранении – меньший габаритный объём;
- автономность – электропитание от аккумулятора;
- электробезопасность – работа во влажных подвальных помещениях.

Модульное проектирование позволило из ограниченного числа функционально законченных и конструктивно согласуемых модулей получать различные типоразмеры портативных бетоносмесителей. Это позволит быстро и эффективно перенастраивать производство в зависимости от потребления рынком тех или иных типоразмеров бетоносмесителей.

Заключение

На основе научно-технического задела предложена масштабируемая технология создания модельных рядов портативных гравитационных бетоносмесителей на базе единой модульной платформы с максимальной унификацией узлов и деталей, которая показала экономическую целесообразность изготовления отечественных бетоносмесителей бытового назначения. Применение модульного проектирования позволили выработать конструктивные решения по улучшению мощностных, массогабаритных, технологических, эксплуатационных и экономических показателей бетоносмесителей бытового назначения за счет применения новых конструкционных материалов, нетрадиционных компоновок с альтернативными электромеханическими приводами. Экспериментальными исследованиями доказаны конкурентные преимущества, эффективность производства и эксплуатации портативных гравитационных бетоносмесителей. Это позволяет не только провести импортозамещение бетоносмесителей бытового назначения, но и в сочетании с имеющейся патентной защитой создавать экспортно-ориентированную продукцию, что приобретает особую значимость для российской экономики.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Автобетоносмесители и автобетононасосы. Развитие. Конструкция. Расчёт: учебное пособие / В.И. Баловнев, С.Н. Иванченко, Р.Г. Данилов, В.В. Сидорков. Хабаровск: Тихоокеанский гос. ун-т, 2021. 186 с.
2. Оптимизация инновационной строительной и транспортной техники, экспериментальная оценка результатов: учебное пособие / В.И. Баловнев, С.Н. Глаголев, Р.Г. Данилов, М.Д. Герасимов. Белгород: БГТУ, 2019. 284 с.

3. Теличенко В.И., Кайтуков Б.А. Скель В.И. К вопросу производительности и унификации гравитационных бетоносмесителей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017. №11. С. 138-143.

4. Гусев Б.В. Применение методов теории подобия и анализа размерностей при изучении влияния основных технологических факторов на свойства бетона // Технологии бетонов. 2014. №9. С. 20-21.

5. Кузнецов Г.А. Минин В.В., Зяблов С.Ф. Малогабаритные гравитационные бетоносмесители: монография / Под ред. В.В. Минина. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2003. 188 с.

6. Минин В.В., Гришко Г.С., Клешнин В.Ю. Методология инновационного проектирования наземных транспортно-технологических комплексов: учебное. пособие. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2021. 108 с.

7. Минин В.В., Кузнецов Г.А., Мальков А.Д. Снижение материалоемкости конструкций бытовых бетонорастворосмесителей гравитационного типа // Строительные и дорожные машины. 2022. №5. С. 7-13.

8. Борбак-оол Н.С. Обзор приводов гравитационных смесителей // Вестник Туvinского государственного университета. Технические науки. 2023. №1. С. 63-70.

REFERENCES

1. Balovnev V.I., Ivanchenko S.N., Danilov R.G., Sidorkov V.V. *Avtobetonosmesiteli i avtobetononasosy. Razvitie. Konstruktsii. Raschet: uchebnoe posobie* [Truck-mounted concrete mixers and truck-mounted concrete pumps: text book]. Khabarovsk: Pacific State University Publ., 2021. 186 p.

2. Balovnev V.I., Glagolev S.N., Danilov R.G., Gerasimov M.D. *Optimizatsiya innovatsionnoy stroitel'noy i transportnoy tekhniki, eksperimental'naya otsenka rezul'tatov: uchebnoe posobie* [Optimization of innovative construction and transport equipment, experimental evaluation of results: text book]. Belgorod: BGTU Publ., 2019. 284 p.

3. Telichenko V.I., Kaytukov B.A., Skel' V.I. *K voprosu proizvoditel'nosti i unifikatsii gravitatsionnykh betonosmesiteley* [On the issue of productivity and unification of gravity concrete mixers]. *Vestnik BGTU im. V.I. Shukhova*. 2017. No. 11, pp. 138-143.

4. Gusev B.V. *Primeneniye metodov teorii podobiya i analiza razmernostey pri izuchenii vliyaniya osnovnykh tekhnologicheskikh faktorov na svoystva betona* [Application of methods of similarity theory and dimensional analysis in studying the influence of the main technological factors on the properties of concrete]. *Tekhnologii betonov*. 2014. No. 9, pp. 20-21.

5. Kuznetsov G.A., Minin V.V., Zyablov S.F. *Malogabaritnye gravitacionnye betonosmesiteli: monografiya* [Small-sized gravity concrete mixers: monograph]. Ed. by V.V. Minin. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publ., 2023. 188 p.

6. Minin V.V., Grishko G.S., Kleshnin V.Y. *Metodologiya innovatsionnogo proektirovaniya nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin: uchebnoe posobie*. [Methodology of innovative design of ground transport and technological machines: text book]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publ., 2021. 108 p.

7. Minin V.V., Kuznetsov G.A., Mal'kov A.D. *Snizhenie materialoyomkosti konstruktsiy bytovykh betonorastvorosmesitelej gravitacionnogo tipa* [Reducing the material consumption of structures of household gravity-type concrete and mortar mixers]. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 2022. No. 5, pp. 7-13.

8. Bobrak-ool N.S. *Obzor privodov gravitatsionnykh smesiteley* [Review of gravity mixer drives]. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2023. No. 1, pp. 63-70.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT AUTHORS
<i>Минин Виталий Васильевич</i> – доктор технических наук, доцент, академик Российской инженерной академии, Сибирский федеральный университет (660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный 79/10, e-mail: vminin@rambler.ru)	<i>Minin Vitaliy Vasil'evich</i> – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Academician of the Russian Academy of Engineering, Siberian Federal University (660041, Russia, Krasnoyarsk, Svobodnyj ave. 79/10, e-mail: vminin@rambler.ru)
<i>Кузнецов Геннадий Аркадьевич</i> – кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет (660041, г. Красноярск, пр. Свободный 79/10, e-mail: gkuznecov@mail.ru)	<i>Kuznetsov Gennadiy Arkad'evich</i> – Ph.D. (Eng.), Assoc. Prof., Siberian Federal University (660041, Russia, Krasnoyarsk, Svobodnyj ave. 79/10, e-mail: gkuznecov@mail.ru)
<i>Мальков Антон Дмитриевич</i> – аспирант Сибирский федеральный университет (660041, г. Красноярск, пр. Свободный 79/10, e-mail: AMalkov2000@yanex.ru)	<i>Malkov Anton Dmitrievich</i> - postgraduate student, Siberian Federal University (660041, Russia, Krasnoyarsk, Svobodnyj ave. 79/10, e-mail: AMalkov2000@yanex.ru)

Статья поступила в редакцию 02.04.2025; одобрена после рецензирования 16.04.2025, принята к публикации 25.04.2025.

The article was submitted 02.04.2025; approved after reviewing 16.04.2025; accepted for publication 25.04.2025.

Научно-производственная статья
УДК 664.9.022

АНАЛИЗ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕРИЙНЫХ МАШИН ДЛЯ ПОРЦИОНИРОВАНИЯ РЫБНЫХ ПРОДУКТОВ

Н.В. Самойлова^{1,*}, А.А. Яшонков², А.М. Крайнов³

¹ Калининградское отделение Международной академии холода, Калининград, Россия

² Керченский государственный морской технологический университет, Керчь, Россия

³ Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

* E-mail: procyon@mail.ru

Аннотация. Показана актуальность реализации процессов порционирования рыбы при расширении производства продуктов питания из водного сырья. Проанализированы производственные возможности российских и зарубежных моделей машин для нарезки рыбы на порции. Установлены характерные недостатки известных конструкций порционирующего оборудования. Анализ показал, что основным физико-механическим процессом при порционировании рыбы является резание материала лезвием, которое по-прежнему остается недостаточно исследованным явлением. Предлагается вести разработку новых конструкций порционирующих машин на основе мехатроники, которая решает проблемы импортозамещения, обеспечения доступности оборудования, увеличения долговечности и надежности, а также улучшения качества продукции. Отмечена настоятельная необходимость применения модульного принципа при проектировании порционирующего оборудования, за счет которого повышаются производственная гибкость и энергоэффективность средств технологического оснащения.

Ключевые слова: порционирование рыбы; машина; технологическое оборудование; резание; нарезка; лезвие; мехатроника.

Для цитирования: Самойлова Н.В., Яшонков А.А., Крайнов А.М. Анализ производственной эффективности серийных машин для порционирования рыбных продуктов // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2025. Т. 11. № 2. С. 89–100.

Original article

ANALYSIS OF PRODUCTION EFFICIENCY OF SERIAL MACHINES FOR FISH PRODUCTS SLICING

N.V. Samojlova^{1,*}, A.A. Yashonkov², A.M. Krainov³

¹ Kaliningrad Regional Branch of International Academy of Refrigeration, Kaliningrad, Russia

² Kerch State Marine Technological University, Kerch, Russia

³ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

* E-mail: procyon@mail.ru

Abstract. The relevance of realization of fish portioning processes during food production by aquatic raw material expanding is shown. The production capabilities of Russian and foreign models of machines for fish cutting to portions are analyzed. Typical shortcomings of known designs of portioning equipment are found. The main physical and mechanical process in fish portioning is cutting the material with a blade, which still remains an insufficiently studied phenomenon. Development new designs of portioning machines based on mechatronics, which solves the problems of import substitution, ensuring equipment availability, increasing durability

and reliability, and improving product quality, is proposed. The urgent need to apply the modular principle in the design of portioning equipment is noted, which increases production flexibility and energy efficiency of technological equipment.

Keywords: *fish portioning; machine; technological equipment; cutting; slicing; blade; mechatronics.*

For citation: Samojlova N.V., Yashonkov A.A., Krainov A.M. Analysis of production efficiency of serial machines for fish products slicing. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11, No. 2, pp. 89–100.

Введение

Проблема эффективного порционирования рыбы имеет важное экономическое и хозяйственное значение. В «Стратегии развития рыбохозяйственного комплекса Российской Федерации на период до 2030 года», утвержденной 26 ноября 2019 года распоряжением Правительства № 2798-р, особое внимание уделяется первичной обработке рыбы, в частности, порционированию рыбного филе, его упаковке и холодильному хранению.

Рыбоперерабатывающее машиностроение является важной и перспективной отраслью, которая в последние годы демонстрирует положительную динамику. Следует отметить, что за последние 8 лет объем производства пищевого оборудования в Российской Федерации увеличился в 2,5 раза, при этом в 51 субъекте страны действует более 270 предприятий.

Производство порционированных ломтиков-филе позволяет сократить потери ценных ингредиентов, а также эффективно реализовать побочные продукты разделывания, т.е. создавать безотходные производства. При этом большое значение имеет реализация процесса порционирования при минимальных энергетических затратах и высокой эффективности порционирующих машин [1-3]. Наиболее перспективным путем повышения эффективности технологического оборудования является не только увеличение производительности, но также снижение усилий резания и энергозатрат за счет совершенствования рабочих органов и режимов обработки [4-6]. Для обеспечения необходимых объемов выпуска рыбной продукции глубокой переработки требуется достаточный парк современных конкурентоспособных порционирующих машин.

В отрасли запатентовано существенное количество устройств для порционирования рыбных продуктов [см., например, 7-9]. Ряд машин для нарезки рыбного филе разработан в последние годы с применением средств и методов мехатроники [10, 11].

Для построения эффективных рыбоперерабатывающих линий проектировщики должны располагать данными о перспективности конструкций технологического оборудования, сведениями о выявленных недостатках порционирующих машин и путях их устранения. В связи с этим, целью настоящей статьи является проведение анализа выпускаемого в России и за рубежом серийного технологического оборудования для порционирования рыбы, а также выявление характерных недостатков и оценка перспективности конструктивных решений для применения в производственных условиях.

Анализ конструкций серийных машин для порционирования рыбных продуктов

Отечественными и зарубежными проектными организациями разработан и серийно выпускается ряд технологических машин для порционирования рыбы [12-15]. Анализ порционирующей техники показывает, что нарезка рыбы на порции осуществляется преимущественно по трем следующим схемам [16, 17]: 1. Пластинчатым ножом с прямой кромкой, совершающим вертикальное возвратно-поступательное движение. 2. Вращающимся ножом с прямой или фигурной кромкой. 3. Блоком вращающихся плоскопараллельных дисковых ножей.

Машина **Norfo FS 600** (Дания) разработана для порционирования мороженого рыбного филе. Оператор укладывает продукт на ленту подающего конвейера, который

перемещает филе в блок нарезки. Резание осуществляется двумя дисковыми ножами, стандартное расстояние между которыми составляет 10 мм. При переходе на другой вид продукции и форму нарезки устанавливается сменный набор ножей. Толщина дисковых ножей зависит от высоты обрабатываемого продукта. Скорость движения конвейера регулируется бесступенчато.

Машина **Norfo PC 2000** предназначена для порционирования рыбного филе на ломтики заданной формы массой от 20 до 300 г. Машина оснащена сканирующим устройством, которое обмеряет филе и передает информацию в ЭВМ. На основании полученных данных рассчитывается площадь сечения среза и вычисляется необходимое расстояние между соседними резами для получения ломтиков заданной массы. ЭВМ управляет исполнительным механизмом, который выполнен в виде дискового ножа, установленного на поворотном рычаге поперек ленты конвейера, а также шаговым приводом конвейера. Наличие ЭВМ позволяет программным способом изменять виды нарезки в зависимости от вида и размеров рыбного филе. Производительность составляет 60 ломтиков филе в минуту. Точность формирования порции составляет ± 5 г.

Машина **Norfo PC 3000** разработана для порционирования филе и круглого продукта на ломтики массой от 100 до 200 г. Филе нарезается под углом от 0 до 45°, а продукт круглой формы – на порции заданной длины. Машина имеет лазерное сканирующее устройство, обмеряющее профиль продукта. Измерительная информация поступает в ЭВМ, которая на основе заданных программ оптимизирует параметры нарезки, что сокращает количество отходов и повышает выход продукции. Машина имеет весоконтрольное устройство, что позволяет формировать по заданной программе партии готовой продукции.

Порционирующая машина **Rosoma 400** фирмы Rostocker Sondermaschinen (ФРГ) предназначена для нарезки филе (со шкуркой или обесшкуренное), а также кальмара. Изделие используется как отдельная машина с оперативным подводом сырья и отводом готовой продукции, так и интегрируется в производственную линию. Слайсер нарезает филе рыбы, а также трубочки кальмара толщиной до 25 мм, полосками шириной 15 мм. При нарезке на кусочки другой ширины требуется модифицировать машину.

Машина работает следующим образом. Филе рыбы укладывается вручную поперек конвейера при работающем конвейере. При нарезке филе со шкуркой филе укладывается шкуркой вверх. По конвейеру рыба подается на участок нарезки и проходит через вращающиеся дисковые ножи. Масса филейчика 50-200 г. Пропускная способность – 60 филе/мин (при обслуживании одним рабочим), 400 кг/ч (в зависимости от размера рыбы, кальмара). Ширина нарезки 15 мм, определяется расстоянием между ножами, возможна различная ширина при доукомплектовании машины. Размеры филе: длина 70-300 мм, ширина 30-120 мм, высота 10-25 мм. Обслуживание – один или два рабочих для укладки филе, конвейер для укладки филе может быть удлинен для создания дополнительных рабочих мест. С конвейера полоски (кусочки) филе попадают в подготовленную емкость. Конвейерная лента легко снимается для чистки при помощи рычажного механизма. Пропускная способность максимум 1300 филейчиков (филе сельди) в час в зависимости от скорости укладки рыбы, при нарезке других пород рыб и размеров возможны отклонения.

Порционирующая машина **NPJ-3000** фирмы Nikko (Япония) является высокоскоростным слайсером, который вырабатывает 3100 рыбных ломтиков в час. Машина обслуживается одним оператором на загрузке. При помощи специальных ножей и системы прижима, все ломтики получают одинаковой толщины. Особенностью слайсера являются управляемые дисковые ножи, которые установлены на вращающейся основе, и автоматически действуют в двух плоскостях – горизонтальной и вертикальной. Установка сканирует обрабатываемую рыбу или филе, определяя размеры и вес продукта. Приближаясь к хвостовой части филе, ножи совершают движения под максимальным наклоном, делая маленькие кусочки визуально большими по объему. Кроме того, оператор самостоятельно

задает требования к нарезке, определяя вес, ширину и высоту каждого кусочка. Основными преимуществами изделия являются значительный угол поворота и наклона ножей, удобная загрузка филе и рыбы, способ нарезки с изменяющимся углом, возможность программирования веса и толщины ломтиков, удобное техническое обслуживание и мойка.

Машина **SM 5290** фирмы Salmco (ФРГ) разработана для порционирования рыбы и филе на кусочки заданного размера. Тушки рыбы укладываются на операционный конвейер в несколько рядов и перемещаются к рабочему органу, выполненному в виде ленточного ножа. Режущий инструмент закреплён на раме, имеющей возможность возвратно-поступательного движения в вертикальной плоскости. В машине предусмотрена возможность регулирования наклона ножа, что позволяет выполнять наклонный рез филе и вырабатывать визуально крупный продукт. Недостатком конструкции является отсутствие измерительных устройств и прижимных приспособлений.

Фирма Salmco также выпускает порционирующую машину **SM 5490**, отличающуюся от предыдущей модели наличием двух конвейеров. Это позволяет одновременно обрабатывать одним режущим инструментом два потока продукта и повысить производительность линии. Для нарезки на порции филе крупных рыб лососевых пород разработана машина **SM 5410**, включающая два операционных конвейера и режущий инструмент, который выполнен в виде ленточного ножа. Модель **SM 5500** имеет подвижный операционный стол, на который укладывается филе крупной рыбы. Ленточный нож расположен горизонтально и закреплён неподвижно. При перемещении стола вертикально и горизонтально нож осуществляет резание в горизонтальной плоскости и нарезает филе на требуемое количество слоёв. Движением операционного стола и конвейером управляет микроЭВМ по заданной программе порционирования.

Выпускается порционирующая машина **NOCK Cortex CB 435/4E Compact-Slicer**, предназначенная для нарезки рыбы и кальмара на куски. Машина имеет широкий диапазон размера нарезки – 8, 16, 24, 32, 40 мм. Резание осуществляется блоком плоскопараллельных дисковых ножей, что обеспечивает калиброванную толщину куска.

Порционирующая машина **Marelec Portio** (Бельгия) предназначена для порционирования рыбного филе, целой рыбы, мяса птицы. Машина комплектуется различными системами фиксации продукта и ножами, а также снабжается тремя видеосканирующими устройствами: одно применяется для плоских продуктов, таких как филе, два других – для сканирования объёмных продуктов. Продукт в машине укладывается на подающий конвейер и далее по мере поступления в камеру нарезки сканируется трехмерным лазерным устройством для определения объема продукта.

Полученные результаты измерений обрабатываются программой, которая определяет место реза ножа с целью деления всего продукта на порции заданного веса или толщины. Наличие дополнительного весоконтрольного устройства позволяет повысить точность порционирования. Машину можно регулировать при помощи панели управления в любой момент процесса резки, что позволяет улучшить результаты. Нож нарезает до 1000 порций в минуту фиксированного веса. Возможно изменение угла нарезки от 0 до 45 градусов. Изменение угла нарезки производится достаточно быстро и без использования инструментов. Оптимальный зазор между лентами загрузки и разгрузки настраивается автоматически. Максимальные габариты продукта: 110 мм x 240 мм x 800 мм.

Порционирующая машина **I-Cut 130** фирмы Marel (Исландия) спроектирована для ротационной высокопроизводительной нарезки рыбных и мясных продуктов. Изделие укладывается на подающий конвейер, движущийся со скоростью до 500 мм/сек. Продукт проходит через лазерный трехмерный сканер для сбора морфометрической информации. Угловой вращающийся нож с прямой кромкой нарезает пищевой материал на порции фиксированного веса или фиксированной длины. Схема резки отображается встроенной ЭВМ на дисплее, что позволяет оператору изменять или адаптировать программу обработки в ходе технологического процесса. Максимальные размеры продукта следующие: ширина

270 мм, длина 980 мм, толщина 150 мм. Предельная скорость нарезки составляет 1000 резов в минуту. Выпускается агрегатированная модель **I-Cut 130 Singulator**, которая позволяет разделять и выравнивать до 200 порций в минуту, вырабатываемых узлом для порционирования. Машина обеспечивает надежное разделение и выравнивание порций непосредственно за режущим органом. Это улучшает технологический процесс и эффективность порционирования, одновременно сокращая потери и повышая качество конечного продукта. В результате машина хорошо сочетается с другими изделиями Marel, такими как автоматические устройства для взвешивания, сортировки, дозирования, маринования, укладки и загрузки лотков.

Порционирующая машина **ТС-07** фирмы **Pisces** (США) рассчитана на нарезку филе сельди и других рыб на кусочки заданного размера. В основе машины находится блок плоскопараллельных дисковых ножей, которые формируют порции размерами 6, 8 и 12 мм из рыбного филе шириной до 600 мм. Машина снабжена столом-накопителем на 70 кг сырья. Во время резания дисковые ножи непрерывно орошаются водой, что позволяет обеспечить хорошее качество поверхности порций.

Порционирующая машина **ПМ-120** фирмы «РостПищМаш» (Россия) предназначена для нарезки филе рыбы, кальмара и других морепродуктов на соломку и палочки одинакового размера шириной от 8 мм до 20 мм. Максимальные размеры обрабатываемого сырья следующие: ширина 250 мм, толщина 35 мм. Рекомендуемые виды рыб для переработки: филе разных пород рыб, филе кальмара, филе морепродуктов. Обеспечена нарезка филе в свежем, размороженном и соленом виде. Производительность составляет 250 кг/час при обслуживании одним оператором. Какие-либо электронные компоненты и системы настройки в изделии отсутствуют.

Машина изготовлена из пищевых нержавеющей сталей и содержит импортные режущие органы. Машина работает следующим образом: филе укладывается на лоток барабана, далее лоток с филе проходит через вращающиеся ножи, в результате чего филе нарезается на палочки или соломку. Нарезанное филе падает в контейнер готовой продукции. Изготавливается в следующих модификациях: ПМ-120-М - для нарезки соломки шириной 8 мм, ПМ-120-5 - для нарезки соломки шириной 10 мм, ПМ-120-8 - для нарезки соломки шириной 12 мм.

Близкой по конструкции является известная машина **ПМ-200** (Россия), которая выпускается для нарезки филе и тушек (с костями) рыбы в свежем, размороженном и соленом виде на кусочки одинакового размера шириной от 8 мм до 45 мм. Диапазон обрабатываемых рыб: длина рыбы до 300 мм, толщина до 65 мм, ширина до 110 мм. Рекомендуемые виды рыб для переработки: сельдь, сардина, скумбрия, ставрида, сайра, форель.

На малых и средних производствах широко применяется порционирующая машина **ИПКС-074-01-140(Н)** фирмы НПП Эльф-4М (Россия). Изделие предназначено для нарезки филейных полутушек при производстве фасованных пресервов. Максимальная производительность составляет 1200 кг/ч. У тушки перед нарезкой должны быть удалены голова, киль брюшка, плавники, внутренности, икра или молока, чешуя, а брюшная полость тщательно промыта и зачищена от крови и пленок. Машина снабжена блоком режущих дисков со специальными углами заточки и устройством автоматической остановки движения полотна транспортера в случае его переполнения продуктом. Имеется возможность варьировать размер нарезаемых кусочков за счет изменения расстояния между режущими дисками. Эффективность разрезания филе достигается за счет разницы линейной скорости движения ленты транспортера и линейной скорости режущей кромки. Изделие может оснащаться блоком управления с двумя частотными регуляторами для независимого регулирования скорости вращения режущих дисков и скорости движения ленты транспортера (модель ИПКС-074-01-140Ч(Н)). Машина выполнена полностью из пищевой нержавеющей стали.

Работа машины осуществляется следующим образом. Филейные полутушки рыбы вручную укладываются на движущуюся конвейерную ленту и подаются в зону нарезки к блоку вращающихся режущих дисков. Режущие диски разрезают полутушку рыбы на кусочки установленного размера. Прижим удерживает тушки рыбы в зоне режущих дисков во время резания. Очиститель служит для очистки конвейерной ленты от налипших кусочков отходов продукта. Кусочки рыбы снимаются с конвейерной ленты вручную.

В целом следует заметить, что для порционирования филе и рыбы на отечественных предприятиях широкое распространение получила конвейерная порционирующая машина, состоящая из ленточного конвейера и ножевого вала, установленных на станине и приводимых во вращение от одного электродвигателя. На ленте конвейера закреплены пластмассовые лотки, имеющие по всей длине углубление, в которое закладывается тушка. На ножевом валу равномерно установлены дисковые ножи, между которыми закреплены проставочные втулки, которые определяют расстояние между ножами и ширину кусков порционированной рыбы. Кроме того, в лотках выполнены прорезы, в которые при резании заходят дисковые ножи. При изменении ширины нарезаемых кусков наладчиком вручную заменяются проставочные втулки, а лотки не меняются, поскольку в них выполнены прорезы для нарезания кусков различной ширины. Такие машины серийно выпускают российские компании «ПК Пищевая инженерия», «НПП Эльф-4М», «РостПищМаш» и другие.

Машина для резки рыбы **CHFC-300** (Южная Корея) предназначена для нарезки замороженной, сырой или вяленой рыбы (скуприя, сельдь, щука, минтай, треска, сайра, лента-рыба) на равные кусочки прямым резом. Минимальная ширина резки - 10 мм. Ширина барабана для укладки продукта - 300 мм. Ширина максимальная укладываемой рыбы в паз - 70 мм. Машина имеет высокую производительность 40-50 рыб/мин, что позволяет заменить труд от 30 до 40 рабочих. Машина технологически имеет возможность отрезать рыбную голову и отводить ее по желобу отдельно от готового продукта.

Многоножевой слайсер **MKS-350** (Южная Корея) предназначен для нарезки филе рыбы или кальмара на куски малой толщины. Минимальная толщина нарезаемого кусочка 2,5 мм. Угол резки можно устанавливать в пределах 22-27°. Плавность и точность работы режущего механизма обеспечивает высокое качество получаемого продукта. На рабочую поверхность машины укладывают продукт, который необходимо нарезать на тонкие пластинки (ломтики). Аналогичную конструкцию имеет многоножевой слайсер **MKS-600**, который предназначен для нарезки бескостного филе лосося, горбуши, кеты или другой крупной рыбы на тонкие пласты. Минимальная толщина нарезаемого кусочка 4 мм. Угол нарезки возможно устанавливать в пределах 22-27°. Максимальная длина филе 520 мм, ширина приемного лотка 250 мм.

В качестве особого вида оборудования необходимо отметить машины для резания рыбных продуктов водяной струей. При этом вода подается под давлением до 400 МПа. Из сопла гидроголовки инжектируется высокоэнергетическая струя, которая разделяется на отдельные капли, разрывающие клеточные структуры обрабатываемого продукта. Разрезаются рыбные кости и мясо филе. Преимуществами такого гидроструйного способа резания является отсутствие повреждений по краям разреза, отсутствие загрязнений продукта инструментом, а также легкое изменение траектории резания. Поскольку гидроструйный режущий инструмент может управляться от ЭВМ, с помощью программного обеспечения выбираются различные формы резания. Кроме того, отсутствует необходимость периодической заточки и чистки инструмента, существенно снижается количество отходов. Гидроструйное резание применяется для нарезания рыбы, порционирования филе, вырезания костей из филе, триммирования, удаления голов и плавников, обесшкуривания.

Примером данного вида оборудования является машина для гидроструйного резания фирмы Frigoscandia (Швеция). Встроенная ЭВМ обеспечивает наиболее рациональный ход порционирования по заданной массе с учётом требований технологии. Рыба или филе подается в машину операционным конвейером, после чего сканируется двумя

видеокамерами, формирующими объёмное изображение. При выработке необходимых данных изделие разрезается струей воды с производительностью до 145 рыб в минуту. В машине увеличен выход продукта за счёт тонкого разреза мышечной ткани, а также практически исключается его обсеменённость в процессе обработки.

Анализ недостатков серийного порционировющего оборудования

Следует отметить основные характерные недостатки известного технологического оборудования для порционирования рыбы. В ряде существующих моделей отсутствует измерительный блок, позволяющий получать и обрабатывать информацию о размерах рыбы и филе. В некоторых устройствах рез осуществляется пластинчатым ножом с большой толщиной лезвия, в результате чего возникают большие силы сопротивления резанию, что отрицательно сказывается на качестве поверхности ломтиков. Управление подающим конвейером и режущим инструментом зачастую осуществляется сложным механизмом, включающим копир, кулачок, ролик, подпружиненный шток и храповое колесо. Это значительно снижает производительность и надежность машин. Вследствие этого существенно ограничены возможности техники для формирования требуемых потребительских качеств продукции, имеются трудности для экономичного использования сырья и энергии.

Наряду с этим, решающим недостатком многих моделей является работа ножей с прямыми кромками в режиме нормального резания. Кромки ножей двигаются перпендикулярно поверхности материала, что обуславливает значительные локальные уплотнения в мясе и разрывы тканей. Кроме того, в начале резания лезвиями с зубчатой формой кромки на поверхности продукта образуются участки, которых не касаются режущие зубцы, и в которые выдавливается продукт с деформацией мяса. Криволинейные фигурные кромки, которые обеспечивают более эффективное порционирование, используются в оборудовании недостаточно вследствие острого недостатка в расчетных методиках [3] и апробированной технологии изготовления. Это приводит к снижению качества готового продукта. При резании образуется стружка, возникают потери ценного сырья. В ряде конструкций подача сырья к ножам осуществляется под действием собственного веса мяса с использованием вибрации, что существенно ограничивает скорость подачи и производительность устройства. Измерение размеров сырья и автоматическая регулировка толщины ломтиков при этом не осуществляются, в связи с чем требуется ручная регулировка оператором.

Кроме того, серьезным недостатком, ограничивающим применение ряда моделей, является резка рыбного филе на ломтики только одной заданной толщины. Для изменения толщины ломтиков в значительном количестве машин требуется демонтаж и замена ножевого вала. Кроме того, качество и скорость резания являются низкими, поскольку филейчики прижимаются к дисковым ножам только под действием силы веса филе. Дисковые ножи зачастую проектируются со значительным запасом прочности вследствие отсутствия расчетных методик, и поэтому имеют большую толщину и вес, что приводит к значительным затратам электроэнергии на вращение ножевого вала.

Следует отметить недостаток, ограничивающий применение многих машин, который заключается в отсутствии возможности смены рабочего органа. В конструкциях не предусмотрены видеокомпьютерные приспособления для получения информации о размерах филе и его консистенции, в результате чего невозможна и автоматическая смена режущих органов. В крайне ограниченной номенклатуре устройств применяется наложение колебаний на режущий орган, что существенно сдерживается недостаточной научно-теоретической базой вибрационного резания пищевых продуктов.

В машинах с вращающимся рабочим органом используется преимущественно уголкового ножа с прямой кромкой. Вместе с тем, такая форма рабочего органа является

наименее эффективной, поскольку не обеспечивает рациональные углы скольжения режущей кромки и заземления материала в продуктовом окне.

Современные тенденции в разработке порционирующего оборудования

Анализ современных тенденций развития техники для порционирования рыбы и пищевого машиностроения приводит к перспективным направлениям повышения конкурентоспособности данного вида изделий:

- комплексная механизация и автоматизация технологических операций на различных стадиях процесса первичной обработки рыбы;
- техническое совершенствование конструкций в условиях непрерывно возрастающих требований;
- повышение в экономически оправданных пределах производительности технологических машин;
- снижение затрат на производство машин в расчете на единицу их нормативной производительности;
- снижение материалоемкости и энерговооруженности порционирующего оборудования;
- повышение долговечности и надежности машин, их подсистем и комплектующих изделий;
- реализация прогрессивных технико-экономических решений, повышающих эффективность технологических линий и предприятий.

Вышеперечисленные тенденции привели в настоящее время к появлению и развитию нового класса техники пищевых производств – мехатронных рыбоперерабатывающих машин. Данное обстоятельство было продиктовано требованиями рынка, а именно тем, что если машина не в состоянии удовлетворить потребности компании-покупателя, то никакие дополнительные затраты и усилия, связанные с использованием маркетинга, не могут улучшить позицию данного изделия на рынке. Именно мехатроника способствовала созданию порционирующих машин более высокого качества в рамках действующей пятизвенной цепочки: наука – техника – производство – сбыт – сервис. Мехатронная машина полностью удовлетворяет пяти базовым критериям: 1. Упрощению конструкции и кинематических цепочек. 2. Удобству и экономичности эксплуатации, включая эргономику, экологию, патентоспособность, ремонтпригодность. 3. Возможности гибкой перенастройки, агрегатирования и модернизации. 4. Живучести, включая надежность. 5. Экономичности проектирования и изготовления, включая технологичность конструкции, унификацию узлов и стандартизацию.

Мехатронное порционирующее оборудование наилучшим образом соответствует внедрению и развитию гибких пищевых систем. Такие гибкие системы обеспечивают следующие преимущества: повышение производительности линий; стабилизацию качества продукции и экономию сырья, энергии и основных фондов; улучшение условий труда персонала; малолюдную технологию; минимальные объемы складских помещений. В настоящее время находятся на этапе становления гибкие пищевые предприятия, способные наладить производство продукции широкой номенклатуры малыми партиями. Следует отметить, что основой таких интеграционных производственных систем также является мехатронное оборудование.

Перечислим основные преимущества агрегатной модульной порционирующей техники:

1. Модульное агрегатирование технологических машин в значительной степени обеспечивает возможность создания оборудования по оптимальному технологическому процессу. Это обусловлено тем, что в данном случае сначала разрабатывается наилучший технологический процесс, а затем по этому процессу komponуют оборудование из имеющихся узлов.

2. Сроки проектирования и сроки изготовления оборудования из унифицированных узлов существенно сокращаются в 6-10 раз по сравнению с созданием специального оборудования. Это имеет особенное значение для малых машиностроительных предприятий.

3. Появляется возможность совершенствовать конструкцию оборудования для порционирования по узлам, вести поэтапную автоматизацию процесса, постепенно встраивая новые, более совершенные исполнительные механизмы и средства автоматизации.

4. Обеспечиваются благоприятные условия для узлового ремонта технологического оборудования. Вышедший из строя узел можно заменить резервным, а после пуска машины ремонтировать неисправный узел.

5. Модульное агрегатирование позволяет выполнять различные операции резания рыбного сырья, измерения физико-механических свойств, настройки рабочих органов, укладки готовой продукции и другие операции в одном технологическом оборудовании, повышая эффективность использования техники.

6. Возможность создания различных компоновок порционирующих машин и рыбоперерабатывающих линий из модульных узлов повышает серийность изготовления этих узлов, что существенно снижает стоимость оборудования.

При проектировании порционирующих машин на основе мехатроники на первый план выходят современные возможности широко регулируемых приводов, которые значительно упрощают кинематическую часть конструкции и исключают механизмы изменения скоростей подачи сырья и перемещения рабочих органов. Имеет место тенденция, заключающаяся в применении приводов для каждого движения технологической машины с целью исключения сложных промежуточных кинематических цепей и зубчатых передач, а также сокращения количества органов управления. Это обуславливает применение в мехатронных порционирующих машинах высокомоментных сервоприводов, состоящих из электродвигателя и микропроцессорного блока автоматического управления. Электродвигатель оснащен встроенным тахогенератором и тормозом, а также импульсным датчиком обратной связи по углу поворота (резольвером). При ротационном порционировании рыбы рабочий орган в виде эксцентрикового ножа закрепляется на вале такого сервопривода посредством предохранительной муфты.

Заключение

Для повышения эффективности порционирующего оборудования требуется устранение вышеизложенных принципиальных проектных недостатков. Результаты анализа современного состояния рыбоперерабатывающей отрасли показывают, что производство порционированных рыбных продуктов является наиболее рациональной и экономически выгодной технологической схемой - вследствие практически полного использования ценного сырья в пищевых целях. Анализ моделей порционирующих машин, выпускаемых ведущими проектно-конструкторскими и производственными компаниями, демонстрирует, что основным физико-механическим процессом при порционировании рыбы является резание, которое по-прежнему остается недостаточно исследованным явлением.

Экспериментальным путем многие конструкторские школы пришли к пониманию того факта, что нормальное резание пластинчатым ножом с горизонтальной кромкой является наименее эффективным с точки зрения ресурсосбережения. В связи с этим, разработчиками был проведен преимущественно эмпирический поиск и подбор более рациональной геометрии рабочих органов. Однако научно обоснованный подход к поиску эффективных форм лезвий для нарезания пищевых материалов на порции в настоящее время разработан недостаточно.

Новый концептуальный подход требуется также при проектировании технологических машин, осуществляющих ротационное резание рыбных продуктов. Данный процесс широко применяется в линиях по переработке сырья животного происхождения в связи с его высокой производительностью и хорошей управляемостью (процесс резания

происходит с автоматическим регулированием положения, скорости и момента рабочего органа). Практика показывает, что расположение режущей кромки относительно продукта оказывает существенное влияние на качество поверхности среза. Вместе с тем, в известных источниках недостаточно освещен вопрос научного обоснования геометрии лезвий для ротационного резания.

Многие из вышеперечисленных теоретических проблем возникают из запросов пищевой техники сегодняшнего дня, которую требуется снабжать системами управления, цифровыми исполнительными приводами и средствами видеоэлектроники. Настоятельно требуется разработка конструкций порционирующих машин на основе мехатроники, которая решает проблемы импортозамещения, обеспечения доступности оборудования, увеличения долговечности и надежности, а также улучшения качества продукции. Необходимо расширять применение модульного принципа при проектировании порционирующего оборудования, повышать его технологическую гибкость и энергоэффективность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M., Piepiórka-Stepuk J., Samojlova N.V., Jakubowski M. Increasing the Efficiency of Food Materials Cutting during Inclined and Shear Movements of Knife. *Materials*, 2022, Vol. 15, 289.
2. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M., Piepiórka-Stepuk J., Giurgiulescu L., Janowicz M., Jakubowski M. Experimental characterization and mathematical modeling of fracture and friction resistance forces during tuna cutting. *Journal of Food Engineering*, 2021, Vol. 307, 110648.
3. Самойлова, Н.В. Математическое моделирование процесса резания рыбы ножом с фигурной криволинейной кромкой / Н.В. Самойлова, О.В. Агеев // Вестник науки и образования Северо-Запада России [Электронный ресурс]. – 2023. – Т. 9. – № 3. – Шифр: ЭЛ № ФС77-63282. – С. 7-26.
4. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov J.A. Mathematical modeling of the resistance force of the profile of a flat-back knife. *Journal of Friction and Wear*, 2019, vol. 40, no. 6, pp. 580-587.
5. Агеев О.В., Наумов В.А., Фатыхов Ю.А., Самойлова Н.В. Математическое моделирование силы сопротивления формы двухкромочного ножа без боковых граней при резании рыбы // Известия КГТУ. 2019. № 53. С. 75-88.
6. Фалько А.Л., Яшонков А.А., Самсонова С.Н. Машина фракционирования корнеплодов // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. 2020. № 1. С. 140-151.
7. Патент № 2576068 С1 Российская Федерация, МПК А22С 25/18. Способ механизированного удаления межмышечных костей из филейных частей транспортируемых рыб и устройство для осуществления способа: № 2014127149/13: заявл. 19.03.2012: опубл. 27.02.2016 / В. Ковальски.
8. Патент № 2173051 С2 Российская Федерация, МПК А22С 25/18. Машина для порционной резки рыбы: № 99113393/13: заявл. 25.06.1999: опубл. 10.09.2001 / В. А. Голованец, Ю. В. Маслак, А. А. Голованец.
9. Патент № 2638536 С1 Российская Федерация, МПК А22С 25/18. Устройство для резки рыбного филе на ломтики: № 2017100864: заявл. 10.01.2017: опубл. 14.12.2017 / О. В. Агеев.
10. Патент № 2671900 С1 Российская Федерация, МПК В02С 18/00, А22С 25/18. устройство для резки пищевых продуктов: № 2017140394: заявл. 20.11.2017: опубл. 07.11.2018 / О. В. Агеев, А. М. Довгялло, Ю. А. Фатыхов [и др.].
11. Патент № 2807633 С1 Российская Федерация, МПК А22С 25/18. Устройство для резки рыбного филе на ломтики: № 2023107583: заявл. 28.03.2023: опубл. 17.11.2023 / О. В. Агеев, Н. В. Самойлова, М. Э. Кокрицкий [и др.].

12. Vandenberghe E., Charalambides M.N., Mohammed I.K., Ketelaere B.D., Baerdemaeker J.D., Claes J. Determination of a critical stress and distance criterion for crack propagation in cutting models of cheese. *Journal of Food Engineering*, 2017, no. 208, pp. 1-10.
13. Sridhar B.S., Sommer K. Finite Element Simulation of Fracture Mechanism of Fibrous Food. *International Journal of Food Properties*, 2013, vol. 16:2, pp. 444-460..
14. Takabi B., Tai B.L. A review of cutting mechanics and modeling techniques for biological materials. *Medical Engineering & Physics*, 2017, no. 45, pp. 1-14.
15. Pagani M, Perego U. Explicit dynamics simulation of blade cutting of thin elastoplastic shells using «directional» cohesive elements in solid-shell finite element models. *Computer methods in applied Mechanics and Engineering*, 2015, no. 285, pp. 515-541.
16. Агеев О.В., Самойлова Н.В., Наумов В.А., Фатыхов Ю.А. Математическое моделирование сил сопротивлений при резании рыбы дисковым ножом // Научный журнал Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2021. № 4(50). С. 46-58.
17. Агеев, О.В. Математическое моделирование сил полезного сопротивления при резании охлажденных пищевых продуктов / О.В. Агеев, В.А. Наумов, Ю.А. Фатыхов // Вестник Международной академии холода. 2020. № 3. С. 70-82.

REFERENCES

1. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M., Piepiórka-Stepuk J., Samojlova N.V., Jakubowski M. Increasing the Efficiency of Food Materials Cutting during Inclined and Shear Movements of Knife. *Materials*, 2022, Vol. 15, 289.
2. Ageev O.V., Dowgiałło A., Sterczyńska M., Piepiórka-Stepuk J., Giurgiulescu L., Janowicz M., Jakubowski M. Experimental characterization and mathematical modeling of fracture and friction resistance forces during tuna cutting. *Journal of Food Engineering*, 2021, Vol. 307, 110648.
3. Samojlova N.V., Ageev O.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessa rezaniya ryby nozhom s figurnoi krivolineinoi kromkoi* [Mathematical simulation of fish cutting process by knife with a figured edge]. *Journal of Science and Education of North-West Russia*, 2023, Vol. 9, No. 3, pp. 7–26.
4. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov J.A. Mathematical modeling of the resistance force of the profile of a flat-back knife. *Journal of Friction and Wear*, 2019, vol. 40, no. 6, pp. 580-587.
5. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A., Samojlova N.V. *Matematicheskoe modelirovanie sily soprotivleniya formy dvukhkromochnogo nozha bez bokovykh graney pri rezanii ryby* [Mathematical simulation of profile resistance force of double-edged knife without side edges during fish cutting]. *Izvestiya Kaliningradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, No. 53, pp. 75-88.
6. Falko A.L., Yashonkov A.A., Samsonova S.N. Machine fractionation of root bears // *Bulletin of the Kerch State Marine Technological University*, 2020, no 1, pp. 140-151.
7. Patent No. 2576068 C1 Russian Federation, IPC A22C 25/18. Method for mechanized removal of intermuscular bones from fillet parts of transported fish and device for implementing the method: application No. 2014127149/13: filed 19.03.2012: published 27.02.2016 / W. Kowalski.
8. Patent No. 2173051 C2 Russian Federation, IPC A22C 25/18. Fish Portion Cutting Machine: application No. 99113393/13: filed 25.06.1999: published 10.09.2001 / V. A. Golovanets, Yu. V. Maslak, A. A. Golovanets.
9. Patent No. 2638536 C1 Russian Federation, IPC A22C 25/18. Fish fillet slicer: application No. 2017100864: filed 10.01.2017: published 14.12.2017 / O. V. Ageev.

10. Patent No. 2671900 Russian Federation, IPC B02C 18/00, A22C 25/18. Food cutting device: application No. 2017140394: filed 20.11.2017: published 07.11.2018 / O. V. Ageev, A. M. Dowgiallo, Yu. A. Fatykhov et al.

11. Patent No. 2807633 C1 Russian Federation, IPC A22C 25/18. Fish fillet slicer: application No. 2023107583: filed 28.03.2023: published 17.11.2023 / O. V. Ageev, N. V. Samojlova, M. E. Kokritsky et al.

12. Vandenbergh E., Charalambides M.N., Mohammed I.K., Ketelaere B.D., Baerdemaeker J.D., Claes J. Determination of a critical stress and distance criterion for crack propagation in cutting models of cheese. *Journal of Food Engineering*, 2017, no. 208, pp. 1-10.

13. Sridhar B.S., Sommer K. Finite Element Simulation of Fracture Mechanism of Fibrous Food. *International Journal of Food Properties*, 2013, vol. 16:2, pp. 444-460.

14. Takabi B., Tai B.L. A review of cutting mechanics and modeling techniques for biological materials. *Medical Engineering & Physics*, 2017, no. 45, pp. 1-14.

15. Pagani M, Perego U. Explicit dynamics simulation of blade cutting of thin elastoplastic shells using «directional» cohesive elements in solid-shell finite element models. *Computer methods in applied Mechanics and Engineering*, 2015, no. 285, pp. 515-541.

16. Ageev, O.V., Samojlova, N.V., Naumov, V.A., Fatykhov, Yu.A., Zubkov, O.A. Mathematical modeling of resistance forces during fish cutting with a disc knife. *Scientific Journal of Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics, and Optics. Series: Processes and Devices of Food Production*. 2021, No. 4(50), pp. 46-58.

17. Ageev O.V., Naumov V.A., Fatykhov Yu.A. *Matematicheskoe modelirovanie sil poleznogo soprotivleniya pri rezanii okhlazhdennykh pishchevykh produktov* [Mathematical simulation of effective resistance forces during cutting of chilled food products]. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2020. No. 3, pp. 70-82.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Самойлова Наталья Владимировна – кандидат технических наук, Калининградское отделение Международной академии холода (236022, Россия, г. Калининград, ул. Профессора Баранова, 43, e-mail: procyon@mail.ru)	Samojlova Natalia Vladimirovna – Ph.D. (Eng.), Kaliningrad Regional Branch of International Academy of Refrigeration (236022, Russia, Kaliningrad, Professor Baranov str., 43, e-mail: procyon@mail.ru)
Яшонков Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, Керченский государственный морской технологический университет (298309, Россия, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82, e-mail: jashonkov@rambler.ru)	Yashonkov Alexander Anatolyevich – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Kerch State Marine Technological University (298309, Russia, Republic of Crimea, Kerch, Ordzhonikidze str., 82, e-mail: jashonkov@rambler.ru)
Крайнов Андрей Михайлович – студент бакалавриата направления «Технологические машины и оборудование», Калининградский государственный технический университет (236022, Россия, г. Калининград, Советский пр-т, 1, e-mail: andrey.kraynov.03@mail.ru)	Krainov Andrey Mikhailovich – bachelor's student in specialty «Technological machines and equipment», Kaliningrad State Technical University (236022, Russia, Kaliningrad, Sovetsky ave. 1, e-mail: andrey.kraynov.03@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 10.06.2025; одобрена после рецензирования 19.06.2025, принята к публикации 21.06.2025.

The article was submitted 10.06.2025; approved after reviewing 19.06.2025; accepted for publication 21.06.2025.