



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ВЕСТНИК

ВОСТОЧНО - СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА ТЕХНОЛОГИЙ И УПРАВЛЕНИЯ

(ВЕСТНИК ВСГУТУ)

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления»
(ВСГУТУ)

ВЕСТНИК
Восточно-Сибирского государственного
университета технологий и управления
(Вестник ВСГУТУ)

Научно-технический журнал

№ 4 (95)

Улан-Удэ
Издательство ВСГУТУ
2024

12+

НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ВЕСТНИК
Восточно-Сибирского государственного университета
технологий и управления
(Вестник ВСГУТУ)

2024

октябрь-декабрь

№ 4 (95)

ISSN 2413-1997

Учредитель

ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет
технологий и управления»

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-74738

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций 29 декабря 2018 г.

Главный редактор

Д.В. Шалбуев, д-р техн. наук, проф.

Заместители главного редактора

Б.А. Баженова, д-р техн. наук, проф.

С.С. Ямпиров, д-р техн. наук, проф.

Редакционная коллегия

Э.Б. Битуева, д-р техн. наук, проф. (ВСГУТУ, Улан-Удэ); М.Б. Данилов, д-р техн. наук, проф. (ВСГУТУ, Улан-Удэ); Д. Дашижамц, д-р техн. наук, проф., акад. МАН (МГУНТ, Монголия); Э.В. Жалнин, д-р техн. наук, проф. (ВНИИМСХ, Москва); С.Д. Жамсаранова, д-р биол. наук, проф. (ВСГУТУ, Улан-Удэ); М.П. Калашиников, д-р техн. наук, проф. (ВСГУТУ, Улан-Удэ); С.М. Коротов, д-р наук, проф. (МДУ, Швеция); В.А. Кравчук, д-р техн. наук, проф. (ТОГУ, Хабаровск); В.С. Лесовик, д-р техн. наук, проф. (БГТУ, Белгород); С.А. Лхасаранов, канд. техн. наук (ВСГУТУ, Улан-Удэ); Б.Д. Лыгденов, д-р техн. наук, доц. (УТУ, Китай); А.А. Майоров, д-р техн. наук, проф. (СибНИИС РАСХН, Барнаул); С.Н. Максимова, д-р техн. наук, проф. (Дальрыбвтуз, Владивосток); Н.И. Овчинникова, д-р техн. наук, проф. (ИрГАУ, Иркутск); Д.Н. Раднаев, д-р техн. наук, доц. (БГСХА, Улан-Удэ); Л.А. Урханова, д-р техн. наук, проф. (ВСГУТУ, Улан-Удэ), В.Е. Рогов, д-р техн. наук, проф. (ВСГУТУ, Улан-Удэ), Т.С. Дембелова, д-р техн. наук, вед. науч. сотр. (ИФМ СО РАН, Улан-Удэ), Б.Б. Бадмаев, д-р техн. наук, доц. (ВСГУТУ, Улан-Удэ).

Журнал «Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук по следующим специальностям с 07.03.2023: 4.3.3 – Пищевые системы (технические науки), 4.3.5 – Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ ((биологические науки, технические науки), 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки), с 01.02.2022: 2.1.5 – Строительные материалы и изделия (технические науки), с 08.07.2024: 1.3.14. – Теплофизика и теоретическая теплотехника (технические науки).

Электронная версия размещается на сайте vestnik.esstu.ru

Журнал представлен в НАУЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКЕ (НЭБ)

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Журнал включен в базу данных EBSCOPUBLISHING (USA) и ЭБС ООО «ЛАНЬ»

Адрес редакции: 670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, д. 40В, строение 1.

Телефон: (3012) 417234; 89021676994; факс: (3012) 417150; e-mail: vestnikvsgutu@mail.ru, office@esstu.ru

Подписной индекс в каталоге «Электронное подписное агентство» АО Почта России – ПН190.

© ВСГУТУ, 2024

Содержание

4.3.3 – ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ (БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ, ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)	5
Аникина В.А., Бадмаева И.И. Изучение вязкости модельных образцов блинного теста из нетрадиционных видов сырья	5
Агеев О.В., Новикова М.А. Перспективы применения кавитационной очистки сточных вод пищевых производств от жиросодержащих включений	14
Кулешова О.С., Тихонов С.Л., Тихонова Н.В., Шихалев С.В. Современные методы определения свежести мяса: мини-обзор	22
4.3.5 – БИОТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ И БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ (БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ, ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)	36
Фролова Н.А., Верховуров В.В., Шкрабтак Н.В., Веремей Е.Е., Гринчук М.А. Анализ биологически активных веществ плодов <i>Hippophae rhamnoides L.</i>	36
Тихонов С.Л., Тихонова Н.В., Тимофеева М.С., Шихалев С.В. Новый пищевой пептид для предупреждения фотостарения клеток: характеристика и подтверждение эффективности <i>in vitro</i>	43
4.3.1 – ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)	52
Шуханов С.Н., Кузьмин А.В., Агафонов С.В., Сухаева А.Р., Косарева А.В. Обзор и анализ исследований рабочего процесса питателей технических средств для разбрасывания твердых органических удобрений	52
Дондоков Ю.Ж., Аммосов И.Н., Дринча В.М., Афанасьева Т.И., Парникова Т.А. Технологические основы интегрированных систем сушки и хранения семян	59
Ямпалов С.С., Нехуров Н.А., Цыбенков Ж.Б., Балданов В.Б., Жигжитов А.О., Стукалова А.В. Математическая модель движения частиц зернового материала по лотку сепаратора с использованием технического зрения	69
2.1.5 – СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)	75
Доржиева Е.В., Аюрова О.Ж., Шестаков Н.И., Цыденова А.Б., Доржиева А.А. Физико-механические свойства древесно-полимерного композита на основе полилактида и древесных отходов	75
Иванов С.А. Резиноасфальтобетон на основе продукта утилизации отходов промышленности	84
Кравчук Е.В., Иодчик А.А., Кравчук В.А. Ресурс несущей способности традиционных и предварительно напряженных биметаллических балок при пластической работе материала их стенки	96
Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Башарин Е.С., Дубовской П.В. Влияние наносuspензии метакаолина на свойства гипсобетона с древесным наполнителем	108
1.3.14 – ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)	115
Шишулькин С.Ю., Москвитин А.А., Чан Ф.Л., Чередов Э.Н., Старинский И.В., Нгуен Нгок Лан. Влияние плазменного трехфазного серийного реактора на сети электроснабжения	115
Правила оформления статей для журнала «Вестник Восточно-Сибирского государственного университета технологий и управления» (Вестник ВСГУТУ).....	124

Contents

4.3.3 – FOOD SYSTEMS (BIOLOGICAL SCIENCES, TECHNICAL SCIENCES)	5
Anikina V.A., Badmaeva I.I. VISCOSITY OF PANCAKE BATTER SAMPLES FROM NON-TRADITIONAL RAW MATERIALS	5
Ageev O.V., Novikova M.A. CAVITATION TREATMENT OF FOOD PRODUCTION WASTEWATER FROM FAT-CONTAINING IMPURITIES: PROSPECTS OF APPLICATION	14
Kuleshova O.S., Tikhonov S.L., Tikhonova N.V., Shikhalev S.V. MODERN METHODS FOR DETERMINING MEAT FRESHNESS: MINI-REVIEW	22
4.3.5 – BIOTECHNOLOGY OF FOOD PRODUCTS AND BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES (BIOLOGICAL SCIENCES, TECHNICAL SCIENCES)	36
Frolova N.A., Verkhoturov V.V., Shkrabtak N.V., Veremey E.E., Grinchuk M.A. ANALYSIS OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES OF <i>HIPPOPHAE RHAMNOIDES L.</i> FRUIT	36
Tikhonov S.L., Tikhonova N.V., Timofeeva M.S., Shikhalev S.V. NEW FOOD PEPTIDE CELL PHOTOAGING FOR PREVENTING: PERFORMANS AND <i>IN VITRO</i> CONFIRMATION OF EFFECTIVENESS	43
4.3.1 – TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (TECHNICAL SCIENCES)	52
Shukhanov S.N., Kuzmin A.V., Agafonov S.V., Sukhaeva A.R., Kosareva A.V. WORKING PROCESS OF TECHNICAL FEEDERS FOR SOLID ORGANIC FERTILIZERS SPREADING	52
Dondokov Yu.Zh., Ammosov I.N., Drincha V.M., Afanasyeva T.I., Parnikova T.A. TECHNOLOGICAL BASICS OF INTEGRATED GRAIN DRYING AND STORAGE SYSTEMS	59
Yampilov S.S., Nekhurov N.A., Tsybenov Zh.B., Baldanov V.B., Zhigzhitov A.O., Stukalova A.V. MATHEMATICAL MODEL OF GRAIN MATERIAL PARTICLES MOVEMENT ALONG SEPARATOR TRAY USING MACHINE VISION	69
2.1.5 – CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS (TECHNICAL SCIENCES)	75
Dorzhieva E.V., Ayurova O.Zh., Shestakov N.I., Tsydenova A.B., Dorzhieva A.A. PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD-POLYMER COMPOSITE BASED ON POLYLACTIDE AND WOOD WASTE	75
Ivanov S.A. RUBBER-ASPHALT CONCRETE BASED ON RECYCLED INDUSTRIAL WASTE	84
Kravchuk E.V., Iodchik A.A., Kravchuk V.A. LOAD-CARRYING ABILITY OF TRADITIONAL AND PRE-STRESSED BIMETALLIC BEAMS UNDER PLASTIC RESPONSE OF THEIR WALL MATERIAL	96
Lukutsova N.P., Pykin A.A., Basharin E.S., Dubovskoy P.V. EFFECT OF METAKAOLIN NANOSUSPENSION ON THE PROPERTIES OF GYPSUM CONCRETE WITH WOOD FILLER	108
1.3.14 – THERMOPHYSICS AND THEORETICAL HEAT ENGINEERING (TECHNICAL SCIENCES) MELTING BASALT FROM THE YENHOR DEPOSIT	115
Shishulkin S.Yu., Moskvitin A.A., Tran F.L., Cheredov E.N., Starinsky I.V., Nguyen Ngoc Lan. EFFECT OF PLASMA THREE-PHASE SERIES REACTOR ON POWER SUPPLY NETWORKS	115

В.А. Аникина, канд. техн. наук, e-mail: valentina-vs@bk.ru
И.И. Бадмаева, канд. техн. наук, доц., e-mail: bii75@mail.ru

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ

УДК 641.563/616.393

ИЗУЧЕНИЕ ВЯЗКОСТИ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ БЛИННОГО ТЕСТА ИЗ НЕТРАДИЦИОННЫХ ВИДОВ СЫРЬЯ

В статье представлены исследования вязкости блинного теста из нетрадиционных видов муки: шлифованного (белого) риса, цельнозерновой рисовой муки. Проведен органолептический анализ модельных образцов по показателям цвета, запаха, вкуса, однородности и текучести. Изучены зависимости вязкости от времени и скорости сдвига. Выявлено, что по показателю вязкости наиболее близким к тесту из традиционного вида сырья является образец из муки необработанного цельнозернового риса. Дана математическая интерпретация изменения вязкости в исследуемых образцах.

Так, закономерности изменения вязкости блинного теста контрольного образца и опытного на основе цельнозерновой рисовой муки могут быть описаны математической моделью Гершеля – Балкли, в образцах из шлифованного риса – моделью Кессона.

Ключевые слова: блинное тесто, вязкость, модельный образец, нетрадиционное сырье, цельнозерновая рисовая мука, мука из белого риса.

V.A. Anikina, Cand. Sc. Engineering

I.I. Badmaeva, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude

VISCOSITY OF PANCAKE BATTER SAMPLES FROM NON-TRADITIONAL RAW MATERIALS

The article presents studies of viscosity of pancake batter made from non-traditional types of flour: polished (white) rice, whole grain rice flour. Color, smell, taste, homogeneity and fluidity of model samples were organoleptically analyzed. The dependences of viscosity on time and on shear rate were studied. The study reveals that sample from unprocessed whole grain rice flour is the closest to the batter from traditional raw material in terms of viscosity. The authors propose mathematical interpretation of viscosity changes in the studied samples. Thus, regularity changes of pancake batter viscosity in whole-grain rice flour samples can be described by the mathematical model of Herschel-Bulkley, in samples from polished rice – by the Caisson mathematical model.

Key words: pancake batter, viscosity, model sample, non-traditional raw materials, whole grain rice flour, white rice flour.

Введение

В настоящее время все больше растет спрос на продукты функциональной направленности, которые содержат ингредиенты, оказывающие благотворное влияние на организм. Это, безусловно, связано с популяризацией здорового образа жизни и, в частности, правильного питания.

Совершенствование рецептуры пищевой продукции, в том числе на основе теста, с учетом принципов здорового питания позволяет улучшить структуру рациона, повысить пищевую ценность и обеспечить диетическим питанием некоторые категории населения [1–6]. Замена пшеничной муки нетрадиционными видами при производстве кондитерских, хлебобулочных и мучных кулинарных изделий изучалась в ряде исследований [7–11]. Наиболее значимыми разработками в этой области являются безглютеновые продукты, необходимые для

формирования адекватного рациона питания людей с целиакией [12–15]. Как известно, данное заболевание предполагает полную непереносимость глютена, содержащегося во многих зерновых культурах – пшенице, овсе, ячмене и ржи. Кроме того, при составлении рациона питания необходимо учитывать скрытый глютен, который в составе продукта может указываться как модифицированный крахмал или гидролизированный белок, входящие в состав различных продуктов в качестве загустителя.

Одним из видов безглютенового сырья при производстве мучных изделий является рисовая мука. В зависимости от сорта зерен рисовую муку подразделяют на произведенную из очищенных от оболочки зерен белого риса – шлифованного (белого) риса – и из неочищенных зерен коричневого риса (цельнозерновую). В настоящее время пищевая промышленность производит рисовую муку из шлифованного риса, муку с повышенным содержанием клейковины (клейкую) и муку из неочищенного риса (цельнозерновую). Тесто на основе рисовой клейкой муки обладает вязким и тянущимся свойствами. Оно применяется для приготовления азиатских десертов [8, 10].

При использовании нетрадиционного сырья в рецептуре мучных кулинарных изделий необходимо учитывать реологические свойства теста. Одним из важнейших технологических показателей является вязкость, которая имеет большое значение для производственного процесса и качества конечного продукта.

Целью работы является изучение вязкости модельных образцов блинного теста, приготовленного с использованием разных видов рисовой муки.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования были выбраны следующие виды блинного теста: из пшеничной муки (контроль) [16]; с мукой из шлифованного (белого) риса производства компании ООО «Пудофф» (образец 1); с мукой из неочищенного риса (цельнозернового) производства компании ООО «ТД Тамбовкрахмал» (образец 2).

Вязкость блинного теста определяли на ротационном вискозиметре Brookfield RVDV-II+ Pro (США, Brookfield Engineering Labs.Inc., 2009), адаптере ULA с диапазоном вязкости 3,0–2000 сПз (ЦКП «Прогресс» ФГБОУ «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления»). Принцип работы данного прибора заключается в измерении степени закручивания откалиброванной пружины при одновременном вращении шпинделя с одинаковой скоростью в образцах блинного теста [17]. Степень трения шпинделя в жидкости автоматически определяется датчиком при вращении калиброванной пружины. Для оценки вязкости образцов блинного теста использовалась программа Rheocalc V3.2, позволяющая осуществлять автоматическое компьютерное управление и сбор данных.

Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментально исследовали три модели блинного теста, приготовленные по классической технологии на основе различных видов муки. Для контрольного образца использовали пшеничную муку высшего сорта, для образца 1 – муку из шлифованного (белого) риса, для образца 2 – цельнозерновую рисовую муку. Рецептуры образцов представлены в таблице.

Таблица

Рецептура исследуемых образцов

Наименование сырья	Контрольный образец*	Образец 1	Образец 2
1	2	3	4
Мука пшеничная, г	416	–	–
Мука из шлифованного риса, г	–	416	–
Мука рисовая цельнозерновая, г	–	–	416
Вода, см ³	1040	1040	1040

Продолжение таблицы

1	2	3	4
Яйца, шт.	$2 \frac{1}{13}$	$2 \frac{1}{13}$	$2 \frac{1}{13}$
Сахар, г	25	25	25
Соль, г	8	8	8
Масса теста, г	1538	1538	1538

Примечание. * – Сборник рецептов блюд и кулинарных изделий: для предприятий общественного питания / авт.-сост. А.И. Здобнов, В.А. Цыганенко. – Киев: Арий, 2014. – 680 с.

Как видно из таблицы, исследуемые образцы аналогичны по составу, за исключением используемой муки.

На первом этапе исследований был проведен органолептический анализ. Рассматривали показатели цвета, запаха, вкуса, однородности, текучести по пятибалльной шкале. Результаты анализа приведены на рисунке 1.

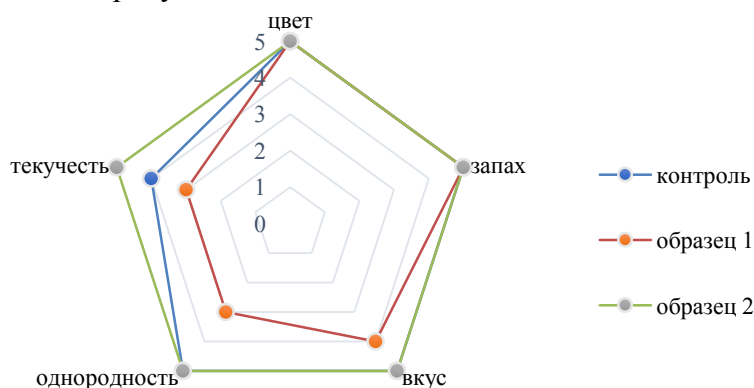


Рисунок 1 – Профилограмма органолептического анализа модельных образцов блинного теста

Органолептический анализ показал, что наиболее близким к контролю по показателям цвета, запаха, вкуса и однородности был образец из муки неочищенного риса. А образец из муки шлифованного риса имел выраженный рисовый вкус и неоднородную консистенцию с включением взвешенных частиц, которые через некоторое время выпадали в осадок.

На следующем этапе изучали структурно-технологические свойства теста, в частности вязкость, поскольку она является одним из основных показателей при замесе теста, который влияет на качество готового продукта.

Графики зависимости динамической вязкости от времени выстаивания теста приведены на рисунке 2.

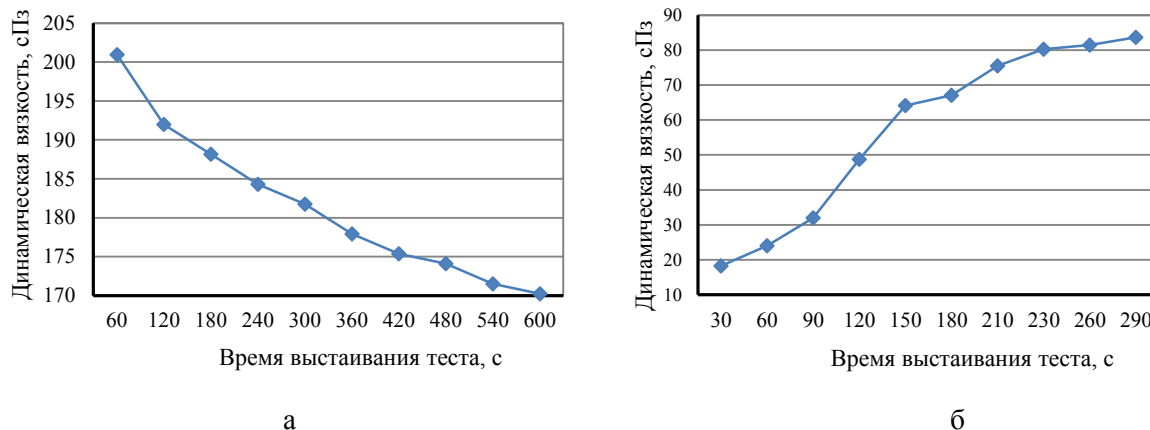
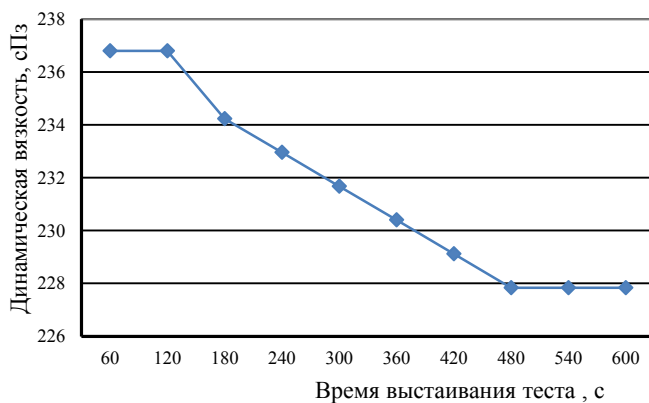


Рисунок 2 – Зависимость вязкости различных образцов блинного теста от времени: а – контрольный образец; б – образец 1



В

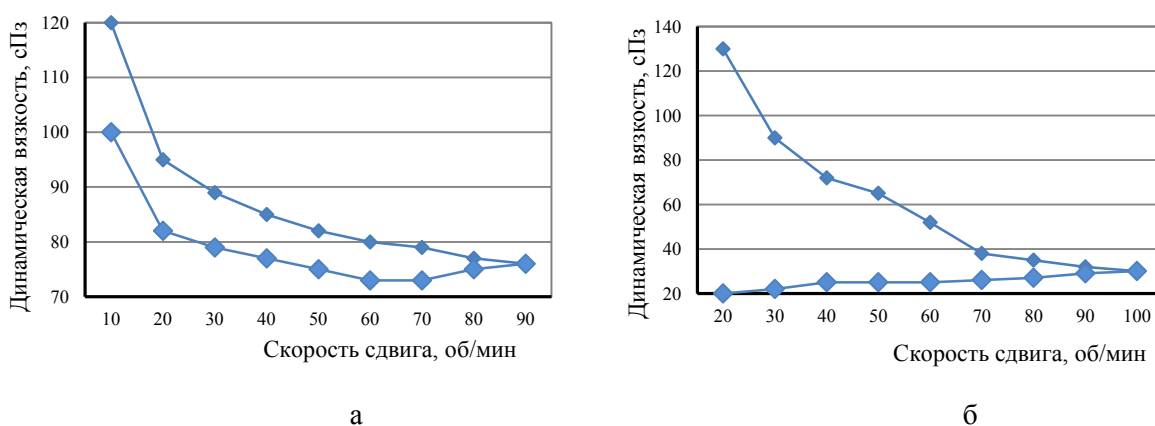
Рисунок 2 (продолжение) – Зависимость вязкости различных образцов блинного теста от времени: в – образец 2

Полученные данные свидетельствовали о том, что значения вязкости образца 1 отличались от контрольного. При увеличении скорости, крутящего момента и скорости сдвига значения вязкости образца 1 находились в пределах от 18,2 до 83,7 сПз, однако, по данным Роскачества, вязкость блинного теста должна быть в пределах от 200 до 600 сПз [18].

Вязкость образца 2 имела значения выше контрольного образца на 17,8–33,8 % и находилась в пределах допустимой нормы. Различие в показателях вязкости образцов может быть связано с химическим составом муки, а именно наличием зерновой оболочки в образце 2. Причем в контроле и образце 2 наблюдалось снижение вязкости с продолжительностью механического воздействия, данное поведение характерно для неньютоновской жидкости. В то время как в образце 1, наоборот, вязкость повышалась с увеличением продолжительности механического воздействия.

Для установления закономерности изменения реологических свойств исследуемых образцов теста было изучено изменение вязкости исследуемых образцов от скорости сдвига.

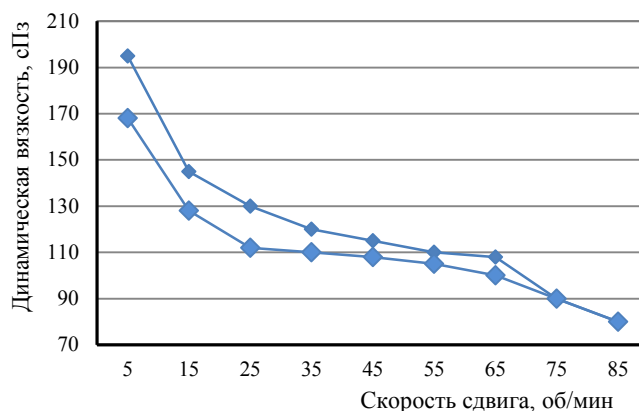
Скорость сдвига изменяли в диапазоне от 5 до 100 об/мин. С увеличением скорости сдвига динамическая вязкость в исследуемых образцах закономерно снижалась (рис. 3).



а

б

Рисунок 3 – Зависимость вязкости различных образцов блинного теста от скорости сдвига: а – контрольный образец; б – образец 1



в

Рисунок 3 (продолжение) – Зависимость вязкости различных образцов блинного теста от скорости сдвига: в – образец 2

Как видно из графических зависимостей, представленных на рисунке 3, модели контроля и образца 2 имели кривую «петля гистерезиса», которая свидетельствует о постепенном снижении вязкости при увеличении скорости вращения и последующем возвращении к исходному значению при снятии нагрузки (снижении скорости вращения). Такие жидкости относятся к тиксотропным жидкостям.

Вязкость образца 1 увеличивалась при увеличении скорости вращения адаптера, после снятия нагрузки. Возможно, образец проявлял свойства дилатного материала, когда кажущаяся вязкость увеличивается с возрастанием напряжения сдвига.

На основе экспериментальных исследований были подобраны математические модели, характеризующие закономерности изменения вязкости образцов теста из разных видов муки. Так, изменения вязкости контроля и образца 2 были описаны математической моделью Гершеля – Балкли.

Математическая модель Гершеля – Балкли является моделью неньютоновских жидкостей, где напряжение, оказываемое на тело, взаимосвязано с напряжением сдвига нелинейной зависимостью. Эта зависимость характеризует три параметра: индексы консистенции (k) и течения (n), а также предельное напряжение сдвига (τ_0). Индекс консистенции можно представить как константу пропорциональности, а индекс течения – как степень разрушения или консолидации структуры при приложении напряжения [19, 20]. Напряжение сдвига можно определить как степень воздействия, которое испытывает жидкость, перед стеканием. Уравнение данной модели можно выразить в следующем виде (1):

$$\tau = \tau_0 + kDn, \quad (1)$$

где τ – напряжение сдвига (предел тягучести), Дин/см²; τ_0 – сдвиговая прочность (сдвигающее напряжение), Дин/см²; k – индекс консистенции, сПз; D – скорость сдвига, с⁻¹; n – индекс течения, безразмерный.

При индексе течения, равном 1, и нулевой сдвиговой прочности математическая модель принимает вид как для ньютоновской жидкости. При одинаковом условии – приложении напряжения сдвига, в случае когда значение индекса течения (n) менее единицы, вязкость жидкости уменьшается, а при возрастании более единицы значения индекса течения (n) вязкость

увеличивается [21]. Высокое значение показателя сдвигающего напряжения (τ_0) свидетельствует о том, что жидкость будет стекать при условии приложения достаточного напряжения сдвига. Данное явление характерно для бингамовских систем.

Применяя программу Rheocalc V3.2 и используя полученную модель, определяли индексы течения и консистенции, а также не только предельное напряжение сдвига, но и степень сходимости (в %) между экспериментальными данными и расчетными значениями.

Математическая модель в графическом виде представлена на рисунках 4 а, б.

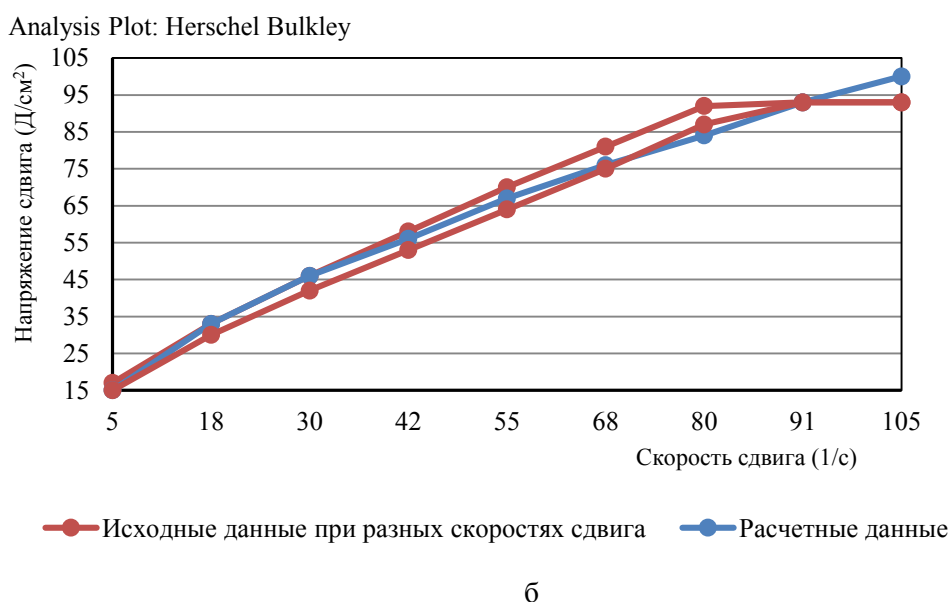
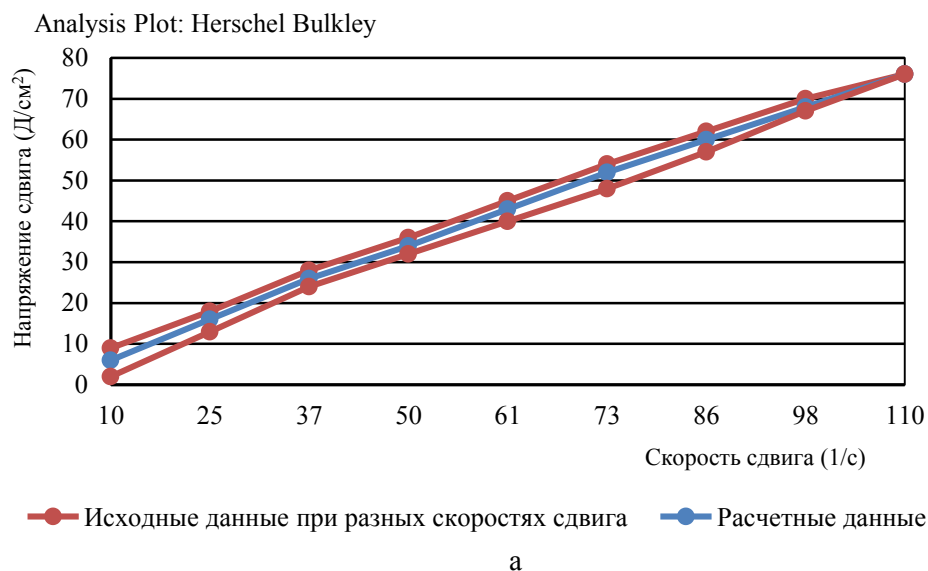


Рисунок 4 – График зависимости между разностью напряжения сдвига и сдвигающего напряжения (сдвигающей прочностью) от скорости сдвига для образцов контроля (а) и 2 (б)

Индекс консистенции для контрольного образца был равен 66,1, индекс текучести – 1,01 и предел текучести составил 5,01. Индекс консистенции для образца 2 был равен 50,3, индекс текучести – 0,64 и предел текучести составил 6,59.

Проведенные исследования свидетельствуют о возможности использования муки из неочищенного риса (цельнозерновой) для приготовления блинного теста, динамическая вязкость которого существенно не отличается от традиционного с пшеничной мукой.

Закономерность изменения вязкости в образце 1 описывается математической моделью Кессона, которая выражается линейной зависимостью напряжения сдвига от скорости сдвига в виде одноименного уравнения. Математическое выражение предела напряжения сдвига определяли как квадрат длины отрезка, отсекаемого прямой относительно оси напряжения сдвига. Данная математическая модель дает возможность проследить за изменением пластических дилатантных жидкостей. Математическое выражение модели Кессона имеет вид (2):

$$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + (\eta D)^{1/2}, \quad (2)$$

где τ – напряжение сдвига (предел тягучести), Дин/см²; τ_0 – сдвиговая прочность (предельное напряжение сдвига), Дин/см²; η – пластическая вязкость, сПз; D – скорость сдвига, с⁻¹.

При использовании данной модели программа Rheocalc V3.2 определяет значения пластической вязкости, предельного напряжения сдвига и степени сходимости (в %) между экспериментальными данными и расчетными значениями [21].

Программа позволяет выстроить графическую зависимость, которая представлена на рисунке 5.

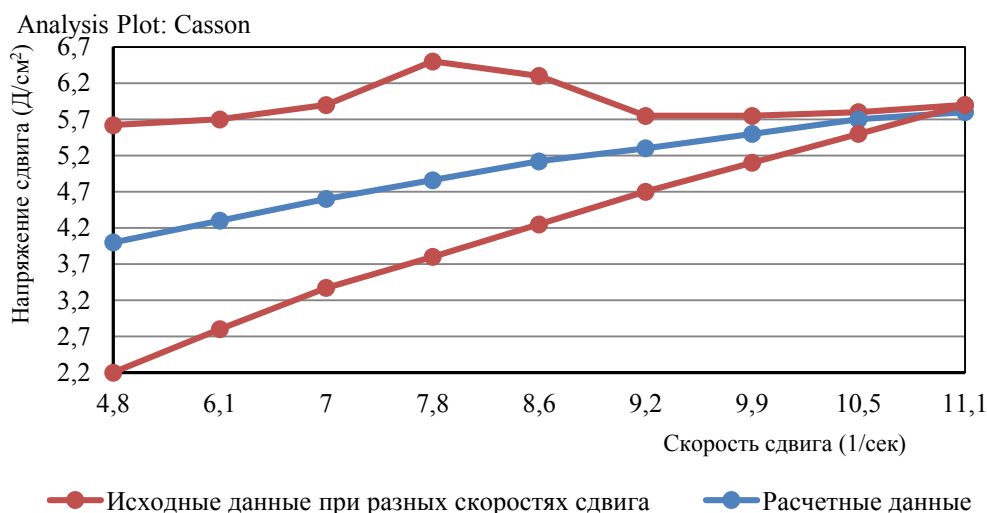


Рисунок 5 – График зависимости квадратных корней из напряжения сдвига от скорости сдвига для блинного теста с мукой из белого риса

Пластическая вязкость для образца 1 была равна 9,54, предел текучести составил 9,55.

Как видно на рисунке 5, вязкость блинного теста из муки белого риса возрастала равномерно при увеличении скорости сдвига. Данный эффект можно объяснить химическим составом муки, который включал в основном крахмал и в котором отсутствовали проламины и глютеины.

Заключение

В результате проведенных исследований были изучены структурно-реологические свойства, в частности динамическая вязкость, моделей блинного теста из разных видов муки. Было установлено, что динамическая вязкость блинного теста из муки шлифованного белого риса уменьшалась на 70 %, а из муки неочищенного риса увеличивалась на 27 % по сравнению с контрольным образцом. Наряду с этим было отмечено, что при постоянной скорости сдвига динамическая вязкость образца с цельнозерновой рисовой мукой изменялась в пределах 236–227 сПз.

На основе результатов исследования были предложены математические модели, описывающие закономерности изменения вязкости блинного теста исследуемых образцов. Так,

закономерности изменения вязкости контроля и образца из цельнозерновой рисовой муки могут быть описаны математической моделью Гершеля – Балкли, образец из шлифованного риса – моделью Кессона. В дальнейшем математические модели могут быть использованы при изучении реологических свойств теста из других видов муки.

Библиография

1. *Пастушкова Е.В., Мысаков Д.С., Чугунова О.В.* Некоторые аспекты фактора питания и здоровья человека // *Здоровье и образование в XXI веке.* – 2016. – № 4. – С. 67–72.
2. *Ревакина В.А.* Проблема пищевой аллергии на современном этапе // *Вопросы питания.* – 2020. – Т. 89, № 4. – С. 186–192. – DOI 10.24411/0042-8833-2020-10052. – EDN IAVQNH.
3. *Тиунов В.М., Крюкова Е.В., Кокорева Л.А.* Разработка безглютенового рациона питания для детей с пищевой аллергией // *Пищевая промышленность.* – 2020. – № 11. – С. 67–69.
4. *Тиунов В.М., Чугунова О.В., Гращенков Д.В.* Особенности разработки рационов питания для детей дошкольного возраста больных целиакией // *Вестник ВГУИТ.* – 2018. – № 2 (76). – С. 211–219.
5. *Ходырева З.Р., Щетинин М.П., Мусина О.Н. и др.* Разработка суточного рациона питания детей с целиакией, находящихся в муниципальных дошкольных образовательных учреждениях // *Вопросы питания.* – 2021. – № 2 (534). – С. 110–116.
6. *Тиунов В.М.* Особенности разработки рационов питания для людей с глютеновой энтеропатией // *Ползуновский вестник.* – 2019. – № 1. – С. 64–70.
7. *Анистратова О.В., Серпунина Л.Т., Кобзарева А.С.* Обоснование применения различных видов муки в рецептуре тестовой оболочки для блинчиков // *Известия КГТУ.* – 2019. – № 53. – С. 89–100.
8. *Хлопонина О.А.* Опыт применения альтернативных видов муки в производстве мучных кондитерских и хлебобулочных изделий // *Хлебопродукты.* – 2015. – № 9. – С. 42–43.
9. *Крюкова Е.В., Чугунова О.В., Тиунов В.М.* Моделирование органолептических показателей качества мучных изделий из второстепенных видов муки // *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов.* – 2016. – № 3(38). – С. 80–87.
10. *Рензеева Т.В., Тубольцева А.С., Рензеев А.О.* Мука различных видов в технологии мучных кондитерских изделий // *Техника и технология пищевых производств.* – 2022. – № 2. – С. 407–416.
11. *Халапханова Л.В., Доржиев В.В., Доржиева А.А.* Использование ячменной муки в производстве сахарного печенья // *Вестник ВСГУТУ.* – 2023. – № 1. – С. 22–28.
12. *Шаталова А.С., Шаталов И.С., Лебедин Ю.С. и др.* Исследование сырья для производства безглютеновых продуктов питания // *Вестник ВГУИТ.* – 2021. – № 2. – С. 143–147.
13. *Попов В.Г., Хайруллина Н.Г., Садыкова Х.Н.* Тенденции использования безглютеновых видов муки в производстве продукции функционального назначения // *Вестник ВГУИТ.* – 2021. – № 1. – С. 121–128.
14. *Темникова О.Е., Рузянова А.А.* Технология производства безглютеновых отделочных полуфабрикатов из нетрадиционного сырья // *Пищевая промышленность.* – 2019. – № 1. – С. 86–88.
15. *Меренкова С.П., Боган В.И., Арапова Д.А. и др.* Обоснование применения композиций безглютеновых видов муки в технологии специализированных мучных кондитерских изделий // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии.* – 2019. – № 1. – С. 12–20.
16. *Здобнов А.И., Цыганенко В.А., Пересичный М.И.* Сборник рецептов блюд и кулинарных изделий: для предприятий общественного питания. – Киев; М., 2003. – С. 426.
17. *Клейменова Н.Л., Болгова М.А., Копылов М.В. и др.* Анализ плотности и реологических характеристик растительных масел в технологическом диапазоне температур // *Известия ТулГУ. Технические науки.* – 2023. – № 4. – С. 155–159.
18. Рейтинг Роскачества. – URL: <https://rskrf.ru/ratings/produkty-pitaniya/bakaleya/muka-blinnaya/>
19. *Корнева О.А., Дунец Е.Г., Руденко О.В. и др.* Исследование кривой вязкости пресного безглютенового теста в зависимости от концентрации разных видов муки // *Пищевая промышленность.* – 2019. – № 6. – С. 62–65.
20. *Васюкова А.Т., Кривошонок К.В., Алексеев А. Е. и др.* Влияние вида жидкости на вязкость суспензии // *Вестник Марийского гос. ун-та. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки.* – 2022. – Т. 8, № 1. – С. 9–18.

21. Кузнецова О.С., Хамагаева И.С. Влияние селенита натрия на динамическую вязкость белковых сгустков // Вестник ВСГУТУ. – 2015. – № 5 (56). – С. 51–55. – DOI 10.53980/24131997_2024_4_57.

Bibliography

1. *Pastushkova E.V., Mysakov D.S., Chugunova O.V.* Some aspects of nutrition factor and human health // Health and education in the 21st century. – 2016. – N 4. – P. 67–72.
2. *Revyakina V.A.* Food allergy problem at the present stage // Nutrition Issues. – 2020. – N 4. – P. 186–192.
3. *Tiunov V.M., Kryukova E.V., Kokoreva L.A.* Development of gluten-free diets for children with food allergies // Food industry. – 2020. – N 11. – P. 67–69.
4. *Tiunov V.M., Chugunova O.V., Grashchenkov D.V.* Features of development of diets for preschool children with celiac disease // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2018. – N 2 (76). – P. 211–219.
5. *Khodyreva Z.R., Shchetinin M.P., Musina O.N. et al.* Development of daily ration for children with celiac disease in municipal preschool educational institutions // Problems of Nutrition. – 2021. – N 2 (534). – P. 110–116.
6. *Tiunov, V.M.* Specifics of developing diets for people with gluten enteropathy // Polzunovsky Vestnik. – 2019. – N 1. – P. 64–70.
7. *Anistratova O.V., Serpunina L.T., Kobzareva A.S.* Use of different types of flour in batter shells for pancakes // KSTU News. – 2019. – N 53. – P. 89–100.
8. *Khloponina O.A.* Use of alternative flour types in production of flour confectionery and bakery products // KHLEBOPRODUCTY. – 2015. – N 9. – P. 42–43.
9. *Kryukova E.V., Chugunova O.V., Tiunov V.M.* Modeling of organoleptic quality indicators of flour products from secondary types of flour // Technology and merchandising of the innovative foodstuff. – 2016. – N 3 (38). – P. 80–87.
10. *Renzyaeva T.V., Tuboltseva A.S., Renzyaev A.O.* Flour of different types in the technology of flour confectionery products // Food Processing: Techniques and Technology. – 2022. – N 2. – P. 407–416.
11. *Khalapkhanova L.V., Dorzhiev V.V., Dorzhieva A.A.* Use of barley flour in sugar biscuit production // ESSUTM Bulletin. – 2023. – N 1. – P. 22–28.
12. *Shatalova A.S., Shatalov I.S., Lebedin Yu.S. et al.* Study of raw materials for the production of gluten-free food products // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2021. – N 2. – P. 143–147.
13. *Popov V.G., Khairullina N.G., Sadykova Kh.N.* Trends in gluten-free flour functional products // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2021. – N 1. – P. 121–128.
14. *Temnikova O.E., Ruzyanova A.A.* Technology of production of gluten-free finishing semi-finished products from non-traditional raw materials // Food industry. – 2019. – N 1. – P. 86–88.
15. *Merenkova S.P., Bogan V.I., Arapova D.A. et al.* Justification of gluten-free flour compositions application in the technology of specialized flour confectionery products // Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and biotechnology. – 2019. – N 1. – P. 12–20.
16. *Zdobnov A.I., Tsyganenko V.A., Peresichniy M.I.* Recipe collection of dishes and culinary products: for catering enterprises. – Kiev; M., 2003. – P. 426.
17. *Kleytenova N.L., Bolgova M.A., Kopylov M.V. et al.* Analysis of density and rheological characteristics of vegetable oils in technological temperature range // News of the Tula state university. Technical sciences. – 2023. – N 4. – P. 155–159.
18. Roskachestvo Rating. – URL: <https://rskrf.ru/ratings/produkty-pitaniya/bakaleya/muka-blinnaya/>
19. *Korneva O.A., Dunets E.G., Rudenko O.V. et al.* Study of viscosity curve of unleavened gluten-free dough depending on the concentration of different types of flour // Food industry. – 2019. – N 6. – P. 62–65.
20. *Vasyukova A.T., Krivoshonok K.V., Alekseev A.E. et al.* Influence of liquid type on suspension viscosity // Vestnik of the Mari State University. Chapter: Agriculture. Economics. – 2022. – Vol. 8, N 1. – P. 9–18.
21. *Kuznetsova O.S., Khamagaeva I.S.* The influence of sodium selenite on dynamic viscosity of protein clots // ESSUTM Bulletin. – 2015. – N 5 (56). – P. 51–55.

DOI 10.53980/24131997_2024_4_14

О.В. Агеев¹, д-р техн. наук, проф., e-mail: oleg.ageev@klgtu.ru

М.А. Новикова², ст. преподаватель, e-mail: mar.novikova@ro.ru

¹ ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»,
г. Калининград

² Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Смоленск

УДК 628.16; 628.31

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ ОТ ЖИРОСОДЕРЖАЩИХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Пищевая промышленность является одной из ведущих отраслей, потребляющей большое количество воды питьевого качества в технологических процессах. Вследствие этого образуются значительные объемы сточных вод, содержащих высокие концентрации загрязняющих веществ с превышением допустимых норм санитарно-токсикологических показателей вредности. В статье обсуждается проблема загрязнения водных ресурсов сточными водами, которые образуются в результате производства пищевых продуктов. Животные и растительные жиры, используемые в пищевой промышленности, являются одними из основных источников загрязнения водных ресурсов. В работе рассмотрено применение ультразвуковой кавитации для очистки жиросодержащих сточных вод. Проведены экспериментальные исследования с целью определения степени очистки сточной воды под воздействием ультразвуковой кавитации и выбора рациональных режимов кавитационной обработки. Показано, что ультразвуковая кавитация является эффективным методом очистки жиросодержащих сточных вод пищевых предприятий.

Ключевые слова: пищевая промышленность, сточные воды, жировые загрязнения, кавитационная очистка, экологизация пищевых систем, глубокая переработка сырья, комплексное использование биоресурсов.

O.V. Ageev¹, Dr. Sc. Eng., Prof.

M.A. Novikova², Senior Lecturer

¹ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad

² The Branch of National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Smolensk

CAVITATION TREATMENT OF FOOD PRODUCTION WASTEWATER FROM FAT-CONTAINING IMPURITIES: PROSPECTS OF APPLICATION

The food industry is one of the leading industries consuming a large amount of drinking water in technological processes. As a consequence, it generates significant volumes of wastewater with high concentrations of pollutants and exceeding permissible norms of sanitary and toxicological harm indicators. The article discusses the problem of water pollution with wastewater, being a result of food production. Animal and vegetable fats used in food industry are main sources of water pollution. The paper considers the application of ultrasonic cavitation for the treatment of fat-containing wastewater. Experimental studies determine the degree of wastewater purification under the influence of ultrasonic cavitation and the choice of rational modes of cavitation treatment. It demonstrates the effectiveness of ultrasonic cavitation method of cleaning fat-containing wastewater in food enterprises.

Key words: food industry, wastewater, fat pollution, cavitation treatment, ecologization of food systems, deep processing of raw materials, integrated use of biological resources.

Введение

Пищевая промышленность является отраслью индустрии, которая характеризуется высоким расходом воды при производстве продукции. Это приводит к накоплению значитель-

ных объемов сточных вод, в которых имеется существенная концентрация загрязняющих веществ. Зачастую это не соответствует нормам по предельно допустимым концентрациям и санитарно-токсикологическим показателям вредности.

Животные и растительные жиры являются природными веществами, которые широко применяются в пищевой промышленности. Они состоят главным образом из глицеридов жирных кислот, которые составляют около 95–97 % их общей массы. Положение осложняется тем, что после рафинирования их содержание увеличивается до 95,5–99,5 %. Кроме того, жиры животного и растительного происхождения содержат сопутствующие вещества, такие как фосфатиды, стеарины, воски и продукты гидролиза глицерина.

Принимая во внимание предельно допустимые концентрации, следует отметить, что предприятия, связанные с переработкой рыбы, мяса, молока и кондитерской продукции, имеют высокое содержание жира в производственных сточных водах [1]. При этом необходимо учитывать, что животные и растительные жиры заметно различаются по своим свойствам и составу. Биотехнологические процессы и мойка оборудования являются ключевыми источниками образования сточных вод на производстве [2]. Технологические операции, реализуемые в обработке жира, включают в себя нагревание, воздействие воды и кислорода, что приводит к появлению новых химических соединений, таких как свободные жирные кислоты, неполные глицериды, продукты окисления и полимеризации. Эти процессы существенно изменяют физические, химические и органолептические свойства жира. В связи с этим при анализе и выборе методов очистки жиросодержащих сточных вод в различных секторах пищевой промышленности необходимо учитывать данные изменения.

В настоящее время при производстве пищевой продукции необходимо совершенствовать технологии, которые являются безотходными или формируют минимальное количество неиспользуемых отходов. Извлечение ценных компонентов из сточных вод позволяет повысить эффективность ресурсосбережения и предотвратить загрязнение окружающей среды [3]. Рекомендуется комбинировать различные методы очистки сточных вод, поскольку зачастую не удается на основе одного метода достичь требуемого уровня удаления загрязнителей, либо их содержание превышает установленные нормы. Кроме того, пищевым предприятиям должны быть доступны современные технологии защиты окружающей среды, среди которых предпочтение отдается малозатратным способам.

С учетом актуальности повышения экологичности пищевых производств существует настоятельная потребность в совершенствовании технологий очистки сточных вод на основе безреагентных методов. Одним из вкладов в решение этой проблемы является использование ультразвуковой кавитации для устранения загрязнения водных ресурсов.

Целью работы является анализ перспективности кавитационного метода для очистки жиросодержащих сточных вод пищевых производств. Данная цель достигается путем исследования условий и механизмов кавитационной дезинтеграции жировых примесей, а также теоретико-экспериментального изучения зависимости степени очистки жидкой среды от частоты, длительности и температурных режимов процесса ультразвуковой обработки.

Материалы и методы исследования

Кавитационная очистка сточных вод – это известный метод, основанный на использовании физического эффекта кавитации. Кавитация – сложный комплекс явлений, связанный с возникновением, развитием и схлопыванием в жидкости мельчайших пузырьков различного происхождения. Ультразвуковые волны, распространяющиеся в жидкой среде, образуют чередующиеся области повышенных и пониженных давлений, создающих зоны высоких сжатий и зоны разрежений. Процесс кавитации зависит от плотности жидкости, ее вязкости, температуры, молекулярного веса, сжимаемости, содержания газов, наличия инородных микроскопических включений, частоты и интенсивности ультразвуковых колебаний, статического давления и других факторов.

Указанный метод эффективен при удалении стойких загрязнений, таких как жир, нефть и другие органические вещества. Кавитационная очистка может применяться как самостоятельный метод очистки, так и в сочетании с другими методами, например фильтрацией и биологической очисткой [4–5]. Ультразвуковое воздействие на водные системы характеризуется рядом одновременных эффектов, которые могут быть использованы для очистки сточных жидкостей на различных этапах технологического процесса, а именно механическим, электрическим, тепловым и химическим факторами. В связи с этим перспективы применения ультразвуковой обработки должны быть проанализированы для каждой стадии очистки отдельно [6].

Явление кавитации в жидких средах может инициироваться ультразвуковым воздействием или обеспечением интенсивного перемещения жидкости в турбулентном режиме – например, за счет введения большого количества малых пузырьков при работе аэратора. Основным механизмом уничтожения микроорганизмов при кавитационной обработке является разрушение клеточных структур под воздействием механических сил [7], а также генерация слабых электрических разрядов, приводящих к образованию активных форм кислорода. Кавитационное воздействие в жидкости вызывает повышение температуры, зачастую до нескольких градусов за минуту, вследствие поглощения выделяемой энергии жидкостью. Экспериментальные данные показывают, что за 30 мин ультразвуковой кавитационной обработки температура среды изменяется с 20 до 54 °С, что объясняется поглощением жидкостью звуковой энергии. Наряду с этим при ультразвуковой обработке происходят химические превращения в воде, которые также способствуют интенсификации процесса очистки сточных вод. Кавитация имеет и отрицательный эффект, который проявляется в механической эрозии поверхностей пищевых аппаратов. Ультразвуковую обработку следует отнести к безреагентному способу очистки и обеззараживания. Решающие преимущества указанного метода состоят в малой чувствительности к окружающим возмущающим факторам и в возможности использования в различных производственных условиях. Важным положительным обстоятельством является то, что ультразвуковая обработка может быть применена на любой стадии очистки жиродержащих сточных вод пищевой промышленности [8].

На начальном этапе очистки сточных вод, который характеризуется высоким содержанием жиров, воздействие ультразвука ускоряет скорость осаждения, за счет чего уменьшается длительность очистки. Это позволяет сократить размеры очистных сооружений, использующих гравитационные методы очистки. Кроме того, дополнительная ультразвуковая обработка содействует образованию кластеров из примесей и сокращает количество тонкодисперсных загрязнений, что в целом повышает эффективность базовых методов очистки [9, 10].

Известно, что сочетание ультразвуковой обработки с реагентами значительно сокращает расход реагентов. Благодаря повышению температуры при озвучивании водной среды происходит ускорение химических реакций, что приводит к повышению эффективности использования реагентов. Одновременно эффект кавитации способствует лучшему перемешиванию реагентов в жидкости, а также улучшает коагуляцию загрязняющих веществ. Как указывалось выше, ультразвуковая кавитация является источником мельчайших газовых пузырьков, которые в свою очередь являются ключевыми элементами процесса флотации. Ультразвуковая обработка повышает гидрофобность частиц, в результате чего они легче прикрепляются к пузырькам и всплывают на поверхность [11–13].

Рассматриваемый метод также улучшает эффективность очистки жиродержащих сточных вод в сорбционных фильтрах за счет диспергирующей способности ультразвуковых колебаний. Тонкодиспергированные частицы, сформированные при воздействии ультразвука, глубже проникают в поры сорбента, что позволяет ему эффективнее удалять загрязнения из водной среды. Помимо этого, ультразвуковая обработка вызывает разрушение молекул продукта, что приводит к образованию активных центров на поверхности сорбента и способствует увеличению его сорбционной способности.

Применение ультразвука также положительно влияет на процессы биологической очистки сточных вод. Исследования [14] показывают эффективность обработки стоков высокочастотным ультразвуком с участием пероксида водорода. При правильной настройке частоты и подобранной продолжительности воздействия ультразвука на активный ил улучшается активность микроорганизмов, что ускоряет процесс окисления субстрата и позволяет сократить габаритные размеры сооружений биохимической очистки сточных вод. Наряду с вышеизложенным следует отметить, что наложение ультразвука совместно с ионообменными методами очистки позволяет значительно повысить эффективность удаления жиров в сточной воде. В работе [15] представлены рекомендации по разработке технологических схем очистки сточных вод.

Кавитационная обработка способствует улучшению массопереноса, поскольку кавитационные пузырьки разрушают статические диффузионные слои вокруг частиц. Ультразвуковая кавитация приводит к образованию активных окислительных соединений, которые способны эффективно разрушать органические и неорганические загрязнения. Таким образом, анализ известных работ показывает, что ультразвуковая обработка жиросодержащих вод обеспечивает эффективную очистку от жиросодержащих загрязнений. Для анализа закономерностей процесса кавитационной очистки сточных вод пищевых производств проведены экспериментальные исследования. При достижении поставленной в работе цели оказалось необходимым решить следующие основные задачи:

1. Установить уровень снижения концентрации загрязняющих жиров в воде под воздействием ультразвуковой кавитации.
2. Установить динамические характеристики процесса кавитационной очистки.
3. Определить рациональные режимы ультразвуковой обработки с целью более полной очистки жиросодержащих сточных вод.

В качестве аналитического метода определения содержания жиров в сточных водах использовался ПНД Ф 14.1:2.122-97 «Методика измерений массовой концентрации жиров в поверхностных и сточных водах гравиметрическим методом». Материалом исследований являлся модельный сток. Для приготовления модельного сточного раствора использовали водопроводную воду и характерные для пищевой промышленности компоненты, такие как сахар, мука, масло, дрожжи, мясо, рыба и молочные продукты.

Приготовление модельного стока производилось в три этапа:

1. Ввод в фиксированный объем водопроводной воды соответствующего количества пищевых продуктов. Количество вводимых продуктов определялось из условий технологии изготовления.
 2. Перемешивание смеси воды.
 3. Отстаивание модельного стока после перемешивания.
- Контроль осуществлялся непосредственно перед обработкой исходной сточной воды.

Таблица

Начальные показатели модельного стока

Номер пробы	БПК ₅ , мг/дм ³	Сухой остаток, г/дм ³	Количество жиров, мг/дм ³	рН	Мутность, FTU
1	2300	3000	97,44	8,40	73,30
2	2200	3100	98,60	8,44	74,60
3	1200	2700	100,88	7,76	47,50
4	1250	3000	99,41	8,40	47,60
5	1000	2790	120,67	7,66	42,20
6	1000	2700	120,90	7,60	41,80
7	1000	3100	125,79	8,44	90,50
8	1020	3000	124,20	8,36	91,20
9	1610	2890	110,00	8,07	76,80
10	1600	2900	110,78	7,89	76,60

Экспериментальные исследования проводились в следующей последовательности:

1. Приготовление модельного стока с различным содержанием взвешенных веществ.
2. Определение начальных параметров жиросодержащей сточной воды.
3. Очистка жиросодержащей сточной воды путем ультразвуковой обработки.
4. Определение и анализ состава обработанной жиросодержащей сточной воды.

Проведена обработка жиросодержащей воды ультразвуком в стационарном режиме при частотах от 20 до 40 кГц для определения влияния температуры обрабатываемого стока на степень очистки. В ходе эксперимента использовались три режима озвучивания с частотами 1–20, 2–30, 3–40 кГц.

Обработка производилась с использованием ультразвукового генератора и ультразвуковой ванны ODA-LQ07. Изменяемым параметром являлось время обработки, которое варьировалось в диапазоне от 0 до 1200 с. Для эффективной очистки сточных вод, допустимая температура протекания процесса очистки составляет 12 °С, в ходе экспериментальных исследований начальная температура стока составляла 20 °С, при кавитационной обработке температура стока поднималась до 35 °С за отведенное время, при принудительном охлаждении минимальная температура составила 18 °С. Для каждого режима обработки проведено 10 испытаний с объемом пробы 200 мл. Была проведена статистическая обработка данных. Для каждого режима обработки рассчитаны значения: среднего, среднеквадратичного отклонения, первого квартиля, медианы, третьего квартиля. Графики строились по средним значениям.

В ультразвуковом диапазоне наиболее распространены пьезоэлектрические генераторы кавитации. В этих электроакустических преобразователях используется пьезоэлектрический эффект в электрических полях. Диапазон частот возбуждения преобразователей является очень широким (могут быть от 1 до 40 кГц и выше). От ультразвукового генератора напряжение ультразвуковой частоты поступает на ультразвуковой преобразователь, который преобразует высокочастотное напряжение в механические колебания ультразвуковой частоты. Эти колебания передаются в излучатель, содержащий концентратор, посредством которого высокочастотные колебания усиливаются и на выходе излучателя могут составлять до 100 микрон и более.

Результаты исследований и их обсуждение

На рисунке 1 приведена экспериментальная зависимость количества кавитационных пузырьков от времени обработки при различных значениях частоты ультразвуковых колебаний. На рисунке 2 изображена зависимость степени очистки модельной среды от времени воздействия ультразвука без охлаждения, на рисунке 3 – с охлаждением жидкой среды.

Рисунок 1 показал, что более высокая частота ультразвуковых волн означала более короткие периоды колебаний давления, что быстрее создавало условия для зарождения кавитационных пузырьков. Анализ теоретических данных показал, что максимальная степень сжатия в точке первого минимума достигалась при частоте около 44 кГц. Значительное снижение частоты также оказывалось неэффективным, так как увеличивало размер пузырька в точке первого максимума, что повышало вероятность деформации его сферической формы и приводило к фрагментации пузырька при сжатии.

Анализ процесса показал, что одним из ключевых факторов повышения эффективности очистки являлся выбор резонансной частоты ультразвуковых колебаний. Увеличение частоты ультразвука приводило к тому, что кавитационный пузырек при высокой частоте не успевал достигнуть необходимого размера, вследствие чего его энергетический потенциал при схлопывании существенно снижался. При чрезмерном снижении частоты возникала диффузия парогазовой смеси внутрь кавитационного пузырька. Кроме того, радиус кавитационного пузырька возрастал настолько, что при его схлопывании эффективность кавитации снижалась.

Рисунок 2 демонстрирует, что для режима очистки сточных вод (без охлаждения обрабатываемых проб) была характерна практически линейная зависимость степени очистки от длительности обработки.

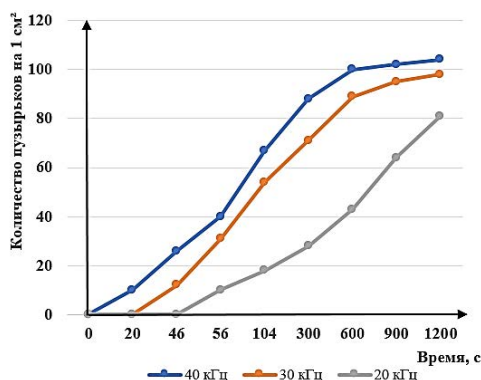


Рисунок 1 – Зависимость количества кавитационных пузырьков от частоты ультразвуковых колебаний

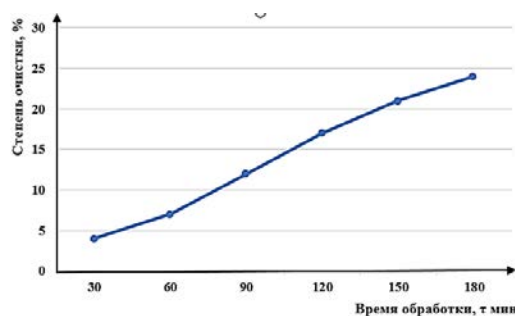


Рисунок 2 – Зависимость степени очистки модельной среды от времени обработки

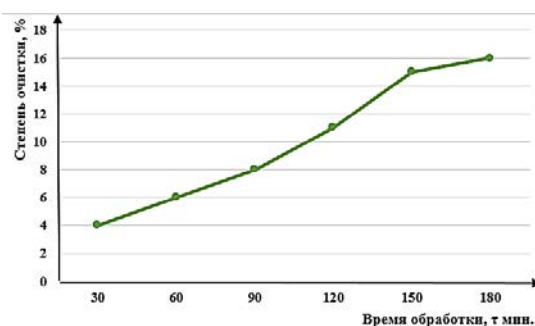


Рисунок 3 – Зависимость степени очистки от времени обработки при снижении температуры модельной среды до 18 °С

Рисунок 3 иллюстрирует, что в случае охлаждения обрабатываемой пробы зависимость степени очистки от длительности обработки принимала вид степенной функции.

По результатам измерений, показанным на рисунке 2, была построена эмпирическая математическая модель в виде линейной регрессии, описывающая зависимость степени очистки s от времени обработки τ :

$$s = 0,136 \cdot \tau - 0,333. \quad (1)$$

По результатам измерений, показанным на рисунке 3, также была построена соответствующая математическая модель в виде степенной регрессии:

$$s = 0,169 \cdot \tau^{0,876}. \quad (2)$$

Результаты экспериментальных исследований показали, что увеличение температуры сточной воды при кавитационной обработке приводило к значительному повышению эффективности ее очистки. Соответственно, принудительное понижение температуры приводило к снижению общей степени очистки стока. Тем не менее при пониженной температуре происходило удаление жиросодержащих загрязнений из водной среды. Результаты наблюдений подтвердили, что наличие в стоках микроскопических механических примесей повышало эф-

фektivность очистки. Это можно объяснить тем, что поверхности таких включений были местами сосредоточения пузырьков микронных размеров, которые являлись зародышами кавитации. Механические примеси стали причиной нарушения в жидкости сплошности, что под воздействием ультразвукового поля приводило к образованию пульсирующих полостей и каверн.

Заключение

Анализ литературных данных и результатов проведенных экспериментов показал, что применение ультразвуковой кавитационной очистки стоков с высоким содержанием жиров целесообразно и перспективно. Установлено, что с увеличением времени ультразвукового воздействия степень очистки возрастает. Показано, что эффективность ультразвуковой очистки сточной воды ухудшается с понижением температуры обрабатываемой среды. Отмечен эффект улучшения процесса очистки при наличии в стоках механических примесей. Определен рациональный диапазон частот ультразвуковых колебаний при очистке сточных вод, выше и ниже которого эффективность процесса снижается. Получены эмпирические математические модели, описывающие зависимости степени очистки модельного стока от времени обработки.

Ультразвуковая очистка – сложный процесс, сочетающий местную кавитацию с действием больших ускорений в очищаемой жидкости, что приводит к разрушению загрязнений и способствует эмульгированию жировых примесей. Интенсивное ультразвуковое воздействие на сточные воды приводит к дезинтеграции жира, масла и другие органических загрязнений водной среды. Кавитационная очистка сточных вод также эффективно удаляет органические загрязнители, такие как жиры из промышленных стоков. Этот метод рекомендован для очистки воды от биологических загрязнений, связанных с присутствием тяжелых металлов. Помимо этого, кавитационная очистка сточных вод отличается большей энергоэффективностью и экологичностью по сравнению с другими ресурсоемкими методами, что способствует внедрению замкнутых систем водопользования.

Библиография

1. *Игнаткина Д.О., Поздняков А.П., Москвичева А.В. и др.* Теоретическое обоснование применимости электрохимического метода обработки сточных вод для предприятий пищевой промышленности // Вестник Волгоградского гос. архитектурно-строительного ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – Вып. 1 (74). – С. 88–96.
2. *Мамай Д.С., Бабеньшев С.П., Мамай А.В. и др.* Методология решения проблемы очистки стоков молокоперерабатывающих предприятий // Вестник ВГУИ. – 2022. – Т. 84, № 1. – С. 214–221.
3. *Вертинский А.П.* Физико-химические методы очистки сточных вод: проблемы, современное состояние и возможные пути совершенствования // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 11. – С. 257–261.
4. *Дубровская О.Г., Кулагин В.А., Курилина Т.А. и др.* Интенсификация процессов биологической очистки сточной воды предприятий пищевого комплекса на основе эффектов гидротермодинамической кавитации // Журнал Сибирского федерального ун-та. Техника и технологии. – 2018. – № 11 (5). – С. 584–590.
5. *Комарова Е.В., Слабунова А.В., Харитонов С.Е.* Применение эффекта кавитации при очистке сточных вод животноводства // Экология и водное хозяйство. – 2021. – Т. 3, № 2. – С. 61–74.
6. *Дубровская О.Г., Кулагин В.А., Сапожникова Е.С.* Современные компоновки технологических схем очистки сточных вод с использованием кавитационной технологии // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2018. – № 2. – С. 217–223.
7. *Викулина В.Б., Пещеркина С.Ю.* Влияние ультразвуковой кавитации на динамическую вязкость водной среды // Системные технологии. – 2018. – № 26. – С. 139–142.
8. *Дубровская О.Г., Кулагин В.А.* Безреагентная очистка промышленных сточных вод, содержащих тяжелые металлы на основе технологии гидродинамической кавитации // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2019. – № 12 (4). – С. 460–467.
9. *Прохасько Л.С.* Расчет кавитационного устройства для очистки промышленных вод // Аграрная наука. – 2023. – № 11. – С. 117–121.

10. *Петрякова О.Д., Гудач М.В.* Оценка преимуществ кавитационного обеззараживания и разработка кавитационного устройства нового типа // Вестник Волжского ун-та им. В.Н. Татищева. – 2011. – № 12. – С. 163–168.
11. *Комарова Е.В., Ляшков М.А.* Экологически безопасные технологии подготовки животноводческих стоков // Экология и водное хозяйство. – 2021. – Т. 3, № 3. – С. 72–88.
12. *Wang B., Su H., Zhang B.* Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment. A review // Chemical Engineering Journal. – 2021. – Vol. 412. – P. 654–685.
13. *Bhat A.P., Gogate P.R.* Cavitation-based pre-treatment of wastewater and waste sludge for improvement in the performance of biological processes: A review // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 9. – P. 725–743.
14. *Астахова С.А.* Обеззараживание воды высокочастотным ультразвуком // Вестник ВСГУТУ. – 2013. – № 4 (43). – С. 164–167.
15. *Бубеев А.Т., Балдаев Н.С., Цыренов В.Ж. и др.* Метаболические основы создания искусственных консорциумов микроорганизмов для утилизации загрязнителей различной природы // Вестник ВСГУТУ. – 2018. – №4 (71). – С. 97–106.

Bibliography

1. *Ignatkina D.O., Pozdnyakov A.P., Moskvicheva A.V. et al.* Theoretical substantiation of electrochemical method applicability in wastewater treatment for food enterprises // Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture. – 2019. – Iss. 1 (74). – P. 88–96.
2. *Mamay D.S., Babenyshev S.P., Mamay A.V. et al.* Methodology of dairy processing plant effluent treatment // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2022. – Vol. 84, N 1. – P. 214–221
3. *Vertinskiy A.P.* Physico-chemical methods of wastewater treatment, current state and possible ways of improvement // Innovations and Investments. – 2019 – N 11. – P. 257–261.
4. *Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Kurilina T.A. et al.* Intensification of biological wastewater treatment processes from food enterprises on the basis of hydrothermodynamic cavitation effects // Journal of Siberian Federal University. Technics and Technologies. – 2018. – N 11 (5). – P. 584–590.
5. *Komarova E.V., Slabunova A.V., Kharitonov S.E.* Application of cavitation effect in livestock wastewater treatment // Ecology and Water Management, – 2021. – Vol. 3, N 2. – P. 61–74.
6. *Dubrovskaya O.G.; Kulagin V.A.; Sapozhnikova E.S.* Modern technological layouts of wastewater treatment with cavitation technology // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2018. – N 2. – P. 217–223.
7. *Vikulina V.B., Peshcherkina S.Yu.* Influence of ultrasonic cavitation on dynamic viscosity of aqueous medium // System Technologies. – 2018. – N 26. – P. 139–142.
8. *Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A.* Reagent-free treatment of industrial wastewater containing heavy metals based on hydrodynamic cavitation technology // Journal of Siberian Federal University & Technologies. – 2019. – N 12 (4). – P. 460–467.
9. *Prokhasko L.S.* Calculation of cavitation device for industrial water treatment // Agrarian science. – 2023. – N 11. – P. 117–121.
10. *Petryakova O.D., Gudach M.V.* Evaluation of cavitation disinfection advantages and development of new cavitation device // Vestnik of Volzhsky University after V.N. Tatischev. – 2011. – N 12. – P. 163–168.
11. *Komarova E.V., Lyashkov M.A.* Environmentally friendly technologies of livestock waste treatment // Ecology and water management. – 2021. – Vol. 3, N 3. – P. 72–88.
12. *Wang B., Su H., Zhang B.* Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment. A review // Chemical Engineering Journal. – 2021. – Vol. 412. – P. 654–685.
13. *Bhat A.P., Gogate P.R.* Cavitation-based pre-treatment of wastewater and waste sludge for improvement in the performance of biological processes: A review // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 9. – P. 725–743.
14. *Astakhova S.A.* Water disinfection by high-frequency ultrasound // ESSUTM Bulletin, 2013. – N 4 (43). – P. 164–167.
15. *Bubeev A.T., Baldaev N.S., Tsyrenov V.J. et al.* The metabolic basis for the creation of artificial consortia of microorganisms for the disposal of pollutants of different nature // ESSUTM Bulletin. – 2018. – N 4 (71). – P. 97–106.

DOI 10.53980/24131997_2024_4_22

О.С. Кулешова¹, аспирант, e-mail: kulieshova_01@mail.ru
С.Л. Тихонов^{1,2}, д-р техн. наук, проф., e-mail: tihonov75@bk.ru
Н.В. Тихонова¹, д-р техн. наук, проф., e-mail: tihonov75@bk.ru
С.В. Шихалев¹, канд. техн. наук, доц., e-mail: sershih@bk.ru

¹Уральский государственный аграрный университет

²Уральский государственный лесотехнический университет
г. Екатеринбург

УДК 637.512.7:637.522(045)

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВЕЖЕСТИ МЯСА: МИНИ-ОБЗОР

Оценка свежести скоропортящихся пищевых продуктов и продовольственного сырья, в частности мяса и мясопродуктов, является важным направлением исследований в области пищевых систем. В основных общепринятых методах определения свежести мяса используют органолептические, микробиологические и физико-химические показатели. Одним из точных методов оценки свежести мяса является анализ изменений, вызванных расщеплением аденозинтрифосфорной кислоты. Для количественного определения производных пурина в пищевых продуктах как одного из показателя свежести используют высокоточные методы, включая высокоэффективную жидкостную хроматографию, капиллярный электрофорез, чрезвычайно эффективную жидкостную хроматографию с масс-спектрометрией, газовую хроматографию с масс-спектрометрией, которые требуют дорогого оборудования, трудоемки и экономически нецелесообразны. Новым направлением в оценке свежести мяса является применение практических биосенсоров, позволяющих недорого и быстро обнаруживать низкие концентрации анализируемых веществ – показателей свежести продукта. Ключевым требованием является разработка оптимальной чувствительной поверхности, которая может стабилизировать молекулы биологического распознавания и должна быть сопряжена с физическими преобразователями, переводящими полученные данные биологического распознавания в количественный сигнал.

Ключевые слова: определение свежести мяса, биосенсоры, протеомика, инструментальные методы, показатели свежести мяса, гиперспектральные технологии.

O.S. Kuleshova, PG student

S.L. Tikhonov^{1,2}, Dr. Sc. Engineering, Prof.

N.V. Tikhonova¹, Dr. Sc. Engineering, Prof.

S.V. Shikhalev¹, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

¹ Ural State Agrarian University

² Ural State Forest Engineering University
Yekaterinburg

MODERN METHODS FOR DETERMINING MEAT FRESHNESS: MINI-REVIEW

Assessment of the freshness of perishable foodstuffs and food raw materials, in particular meat and meat products, is an important area of research in the field of food systems. The main generally accepted methods for determining freshness of meat include organoleptic, microbiological and physico-chemical parameters. One of the most accurate methods for assessing meat freshness is the analysis of changes caused by the cleavage of adenosine triphosphate. To quantify purine derivatives in food products, as one of the indicators of freshness, high-precision methods are used, including high-performance liquid chromatography, capillary electrophoresis, extremely effective liquid chromatography with mass spectrometry, gas chromatography with mass spectrometry. All abovementioned methods are time-consuming, economically impractical and require expensive equipment. A new direction in assessing the freshness of meat is the use of practical biosensors that make it possible to inexpensively and quickly detect low concentrations of analyzed substances – indicators of product freshness. The key requirement is considered to be the development of an optimal sensitive surface that can stabilize biological recognition molecules and must be coupled with physical transducers that translate the obtained biological recognition data into a quantitative signal.

Key words: meat freshness determination, biosensors, proteomics, instrumental methods, meat freshness indicators, hyperspectral technologies.

Введение

Мясо и мясопродукты относятся к скоропортящейся пищевой продукции, поэтому разработка новых, совершенствование известных способов увеличения хранимоспособности и определения свежести мясного сырья и продуктов его переработки являются важным направлением исследований в области пищевых систем. Авторами [1] установлено, что введение в рецептуру мясных рубленых котлет лука угловатого ослабляет развитие окислительной и микробиологической порчи продукта, а внесение 0,2 % высушенного лука угловатого в измельченный говяжий, конский и свиной жиры тормозит процесс окисления и может способствовать удлинению сроков хранения животных жиров [2].

Существует три основных общепринятых метода определения свежести мяса на основе органолептических, микробиологических и физико-химических показателей. Физические и химические тесты или микробиологические эксперименты отличаются высокой точностью, но трудоемки [3]. Сенсорный анализ прост, однако результаты этого типа оценки часто субъективны и не могут представить точные данные для количественного или качественного анализа [4].

В настоящее время применяют инструментальные аналитические технологии, включающие использование электронного носа [5, 6], спектроскопию [7–9], газовую хроматографию-ольфактометрию (GC-O) [10, 11], хроматографию-масс-спектрометрию [12–14] и др. Технология GC-IMS сочетает в себе высокую разделяющую способность газовой хроматографии и быстрый отклик спектрометрии ионной подвижности [15]. Но вместе с тем разработка новых методов определения свежести скоропортящейся пищевой продукции остается актуальным направлением научных исследований.

Поэтому **целью работы** является анализ современных методов, направленных на определение свежести мяса.

Материалы и методы исследования

Для поиска информации по методам оценки свежести мяса был определен запрос по ключевым словам: «свежесть мяса», «определение свежести пищевых продуктов», «показатели свежести мяса», «биосенсоры для определения свежести» и др. Поиск необходимой литературы был ограничен десятью годами. Был проведен ручной поиск статей, на которые имелись ссылки в информативной статье. Для анализа методов определения свежести мяса использованы аннотации, полнотекстовые статьи из журналов открытого и закрытого доступа, размещенных в отечественных и зарубежных базах данных.

Результаты исследований и их обсуждение

За последние десять лет были открыты гиперспектральные методы как новый тип метода экспресс-неразрушающего контроля. Гиперспектральные методы привлекли большое внимание из-за высокой аналитической эффективности, отсутствия необходимости разрушать образец, сложной предварительной обработки и одновременного анализа нескольких показателей. Гиперспектральные технологии широко используются для обнаружения и оценки качества пищевых продуктов и физико-химических показателей, таких как общий летучий азот, тиобарбитуровая кислота. Гиперспектральные методы имеют широкий спектр применений и могут быть использованы для определения свежести мяса и мясопродуктов [3–10, 16]. С помощью этих методов можно количественно определять семь метаболитов пуринов по всему пути метаболизма пуринов и разделять сложные смеси на составляющие их компоненты [10].

Перспективным направлением в определении свежести мяса является новый подход с использованием фудомики. Метаболиты, такие как ацетат, лактат, сукцинат, аланин и аминокислоты с разветвленной цепью, могут быть применены в качестве потенциальных биомаркеров для оценки порчи мяса. При применении протеомного метода идентифицируют семь белков (фосфоглюкомутаза-1, пируваткиназа, тяжелая цепь кинезина-1, тропонин Т, десмин и актин) мышцы палтуса (*Scophthalmus maximus*) выявляют их изменения при хранении. Установлено, что количество вышеуказанных белков достоверно коррелирует с TVB-N, значением К

и TVC. Порча мяса напрямую связана с активностью микроорганизмов и эндогенных ферментов, влияющих на метаболизм мясных белков. Таким образом, использование белков и их метаболитов представляет собой вспомогательный подход к оценке свежести мяса. Пептидомика, развивающееся направление протеомики, является мощным инструментом для определения свежести и качества мяса. Применение методов пептидомики для идентификации биомаркеров для оценки качества мяса расширилось. Пептиды АРАРАРАРРКЕЕКІ и РАРАРАРАРАРАРАРРКЕ, идентифицированные через 9 месяцев после вяления, могут быть потенциальными маркерами для контроля времени вяления и конечного качества окороков сухого вяления. Идентифицированы четыре эндогенных пептидных маркера методом UHPLC-Q-TOF, которые заметно изменялись со временем хранения, что указывает на их потенциал в качестве индикаторов срока годности. Имеется информация об изменениях эндогенных пептидов во время консервирования свинины и их потенциале в качестве биомаркеров свежести мяса [17–24].

Одним из точных методов оценки свежести мяса является анализ изменений, вызванных расщеплением АТФ, поскольку высокая концентрация катаболитов АТФ хорошо коррелирует с потерей свежести мяса [25]. Однако синтез АТФ происходит из-за катаболизма накопленного гликогена, что приводит к образованию лактата и снижению рН мяса [24]. Со временем уровень АТФ в мышцах будет снижаться, что приведет к дисфункции саркоплазматического белка и активации фермента АТФ, расщеплению АТФ на его метаболиты [26]. Катаболический путь АТФ приводит к образованию метаболитов, таких как аденозиндифосфат (АДФ), аденозинмонофосфат (АМФ), инозинмонофосфат (ИМФ П), инозин (ИНО) и гипоксантин (Нх) [27]. Гипоксантин (Нх) подвергается дальнейшему окислению, в результате чего образуются ксантин (Ха) и мочевая кислота (UA) По содержанию вышеуказанных веществ можно определить свежесть мяса [28]. Концентрация ИМП в мясе может быстро увеличиваться, а АТФ, АДФ и АМФ быстро расщепляется [29]. Расщепление АТФ до ИМП придает мясу приятный пикантный вкус [15, 30]. Однако снижение ИМП и образование ИНО и гипоксантина всегда были связаны с потерей свежести. Гипоксантин обычно указывает на свежесть и срок годности мяса [31]. Катаболизм белков, образующих АТФ, в основном вызывается ферментативными реакциями, но следует учитывать, что на гидролиз ИМП, который образует ИНО и гипоксантин, в основном влияют бактерии порчи мяса [32, 33]. АТФ-ассоциированные соединения быстро разлагаются в присутствии ферментов, включая АТФазу, миокиназу, АМФ-деаминазу, 5'-нуклеотидазу, нуклеозидфосфорилазу и ксантиноксидазу [33–35]. Роль каждого фермента в катаболизме АТФ с образованием его метаболитов, по данным [36], показана на рисунке.

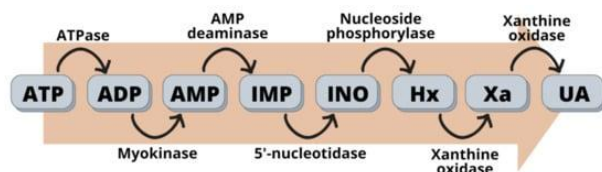


Рисунок – Катаболизм АТФ с соответствующими ферментами, ответственными за окисление каждого соединения [36]

Для количественного определения производных пурина в пищевых продуктах как одного из показателей свежести используется несколько традиционных методов, включая высокоэффективную жидкостную хроматографию (ВЭЖХ) [36–38], капиллярный электрофорез (СЕ) [39], чрезвычайно эффективную жидкостную хроматографию с масс-спектрометрией (УВЕЙХ-МС) [40, 41], газовую хроматографию с масс-спектрометрией, (ГХ-МС) [42], масс-спектрометрию [43] и спектрофотометрические методы [44]. Несмотря на высокую селектив-

ность и низкие пределы обнаружения, вышеупомянутые методы требуют очень дорогого оборудования, чрезвычайно трудоемки, требуют участия человека и являются экономически неэффективными [9, 45].

Нанотехнологии набирают популярность в пищевой промышленности, поскольку датчики на основе нанотехнологий успешно используются для измерения метаболитов пищевых продуктов [46–48]. Разработано несколько методов для анализа и мониторинга присутствия производных пурина в образцах мяса. Создание практических биосенсоров, позволяющих недорого и быстро обнаруживать низкие концентрации анализируемых веществ является предметом интенсивных исследований для проведения измерений в таких областях, как клиническая диагностика, мониторинг окружающей среды и безопасность пищевых продуктов. Успех биосенсоров, в отличие от традиционных аналитических методов, зависит от достижения надежности и точности для анализа в полевых условиях. Ключевым требованием является разработка оптимальной чувствительной поверхности, которая может стабилизировать биологические молекулы и быть сопряжена с физическими преобразователями, преобразующими данные биологического распознавания в сигнал, поддающийся количественной оценке [49–51].

Известны биосенсорные методы оценки свежести мяса на основе определения ксантиноксидазы. Широкое применение ксантиноксидазы для оценки свежести мяса обусловлено ее биосовместимостью, хорошими механическими свойствами, высокой активностью и стабильностью. Эти свойства, а также ее способность генерировать мощный и обратимый ток в присутствии кислорода делают ее пригодной для использования в биосенсорах [52]. Кроме того, ксантиноксидаза является ферментом, который катализирует окисление ксантина до мочевой кислоты и играет важную роль в метаболизме пуринов в организме [53]. Следовательно, ксантиноксидаза полезна для измерения концентрации ксантина и мочевой кислоты.

Авторами [54] предложен амперометрический ксантиновый биосенсор для определения свежести рыбного мяса. Сущность метода заключается в оценке количества присоединенных наночастиц ксантиноксидазы к золотым электродам (Au). Этот биосенсор показал предел обнаружения и линейность 0,01 мкм и 0,01–1,0 мкм соответственно. Использование наночастиц ксантиноксидазы в конструкции амперометрического ксантинового биосенсора упростило его изготовление, поскольку ксантиноксидазы были иммобилизованы посредством ковалентного связывания непосредственно с поликристаллическими электродами Au. Содержание гипоксантина в образцах рыбы также можно оценить с помощью разработанного биосенсора ксантиноксидазы и уриказы, иммобилизованного на поверхности пластины электрохимической полимеризацией паратолуолсульфоната полипиррола (PPy-pTS).

Несмотря на большие усилия и значительный прогресс в области биосенсоров, лишь немногие из них находят место на коммерческом рынке. Первым примером коммерческого биосенсора является ферментативный биосенсор глюкозы [42]. Ганбари и Неджабати [55] разработали многоамперометрический датчик на основе стеклоуглеродного электрода, модифицированного графеном / хитозаном / оксидом хрома (GCE / rGO / CS / Cr 2O3), для контроля уровней дофамина (УД), мочевой кислоты (АМ), ксантина (КС) и гипоксантина (ГК) в мышечной ткани. Датчик показал хорошую чувствительность к УД, Ха и ГК с постоянным линейным диапазоном 5–160, 10–500, 10–400 и 2–300 мкм. Язданпараст и др. [56] иммобилизовали ксантиноксидазу на стеклоуглеродном электроде, состоящем из многостенного нанокompозита из углеродных нанотрубок и пленки из L-аспарагиновой кислоты. Демонстрация биосенсора была успешно проведена с помощью анализа ксантина в мышечной ткани рыбы с пределом обнаружения всего $3,5 \times 10^{-4}$ мкм и линейным диапазоном 0,001–0,004 и 0,005–50,0 мкм. Сонг и др. [17] разработали новый биосенсор на основе ZnIn2S4 / UiO-66-NH₂, 2-модифицированного стеклоуглеродного электрода для определения содержания ксантина и гипоксантина при оценке свежести рыбы. Включение UiO-66-NH₂ улучшило функциональность биосенсора и обеспечило хорошее одновременное обнаружение ксантина и гипоксантина в широких линейных диапазонах 0,025–40 мкм и 0,3–40 мкм, а также низкие значения LOD 0,0083 мкм и 0,1 мкм.

Одно из основных направлений применения иерархических наноструктур заключается в разработке биосенсоров на основе полевых транзисторов для обнаружения различных анализируемых веществ. Биосенсор способен также специфически отличать комплементарную ДНК от ДНК с несовпадением одного основания, ДНК с несовпадением трех оснований и некомплементарной ДНК, что позволяет использовать его для оценки и скрининга однонуклеотидного полиморфизма. Высокочувствительный ($2,87 \times 10^5$ А/А для 10 мМ глюкозы при $V_G = 20$ В) и многоразовый биосенсор из диселенида вольфрама (WSe_2) был модифицирован GOx и получен биосенсор на основе глюкозы. Механически отшелушенные частицы WSe_2 обрабатывали плазмой слабой мощности O_2 для стимулирования химической активности перед иммобилизацией глюкозооксидазы посредством сшивания глутаровым альдегидом.

Пьерини и др. [31] был предложен простой, быстрый и недорогой метод определения содержания гипоксантина, ксантина и мочевой кислоты в образцах мяса с использованием электрода из пиролитического графита с плоской кромкой. Метод имел линейные диапазоны от 0,1 до 50 мкМ для гипоксантина и ксантина и от 0,1 до 25,0 мкМ для мочевой кислоты с LOD 0,08, 0,06 и 0,03 мкМ соответственно.

Оптические датчики привлекли внимание исследователей к аналитическим приложениям, таким как мониторинг и оценка биологических и химических веществ. Оптические волокна обладают превосходной устойчивостью к помехам из внешней среды, что позволяет им быть высоконадежными и стабильными и в определенной степени расширяет область их применения. Для достижения сенсорной функции и повышения чувствительности часто используются специальные процедуры обработки для изменения геометрии волокна, чтобы нарушить первоначальный режим передачи с полным отражением. Методы обработки включают вытягивание конуса, сращивание сердцевины со смещением, лазерное травление и боковую шлифовку и полировку.

Лю с соавторами [57] использовали новый, простой, чувствительный и надежный флуоресцентный датчик на основе нуклеазы S1, окДНК, называемой FАM (ДНК-F), и оксида графена (GO) для определения свежести мяса КРС в присутствии аденозинтрифосфата (АТФ). В оптимальных условиях была достигнута линейная корреляция между флуоресценцией и концентрацией АТФ в диапазоне от 20 мкМ до 3500 мкМ с пределом обнаружения 3,2 мкМ. Чен и соавторы [58] разработали флуоресцентный биосенсор с использованием наночастиц платины (Pt NP), которые обладают активностью, имитирующей пероксидазу, для быстрого обнаружения гипоксантина. Была показана линейная зависимость между интенсивностью флуоресценции и концентрацией гипоксантина в образцах со значениями от 8 до 2500 мкМ. Предел обнаружения флуоресцентного биосенсора Pt-NPS составлял всего 2,88 мкМ при отличной скорости извлечения 103,94–109,00 %.

Чжаном и соавторами [4] разработан метод флуоресценции, который показал предел обнаружения гипоксантина в образцах мяса от 0,7 ммоль.

Мултонгчун и Типа [59] разработали быстрый, чувствительный и экономичный колориметрический биосенсор (лабораторный на бумаге) для ферментативных каталитических реакций (ксантинооксидаза), который позволяет обнаруживать гипоксантин в образцах свежего и обработанного мяса в течение 5 мин. Метод основан на спектрофотометрическом определении гипоксантина и показал высокую точность, а также тот факт, что она не требует специальных инструментов, что является альтернативой традиционным методам. Линейный диапазон содержания гипоксантина составляет от 5 до 40 мг/л с пределом обнаружения 1,8 мг/л. Низкий предел обнаружения и широкий линейный диапазон лабораторного колориметра на бумаге указывают на высокую чувствительность и хорошую точность обнаружения и измерения концентрации гипоксантина в образцах свежего и обработанного мяса. Что касается аналитических свойств, все три ранее описанных колориметра обладают хорошей чувствительностью, точностью и безошибочностью при обнаружении и измерении концентраций ксантина или гипоксантина в различных типах образцов.

Ван и соавторы [60] разработали метод определения свежести мяса на основе определения присутствия гипоксантина (Нх) пероксидазоподобной активности легированного кобальтом нитрида углерода графита (совместно допированный g-C₃N₄). Согласно исследованиям, Нх может быть обнаружен непосредственно спектральным поглощением на длине волны 652 нм с пределом обнаружения (LOD) 1,84 мг / кг и линейным диапазоном от 2,50 до 153,1 мг/кг. Низкое значение LOD и широкий линейный диапазон колориметра с сопутствующим легированием g-C₃N₄ указывают на высокую чувствительность и точность определения концентрации Нх в продуктах.

Мустафа и Андрееску [61] синтезировали надежное колориметрическое устройство без использования реагентов для контроля свежести мяса и прогнозирования порчи путем измерения уровня гипоксантина. Во время исследования оксид ксантина за и нитрозиния тетразолия хлорид (NBT) обрабатывали золь-гелем с биогидратом, в результате чего содержание гипоксантина в нем было низким – 3,7 мкм. Низкое значение LOD на колориметрическом приборе, не реагирующем на реакцию, указывает на высокую чувствительность при обнаружении гипоксантина в образцах мяса. Мустафа и др. [62] создали нанокатализатор, имитирующий фермент, со множеством функций в качестве имитатора пероксидазы, хромогенного индикатора и усилителя окислительно-восстановительных процессов, наночастиц церия (CeNP) и биосенсора на основе ксантиноксидазы (XOD) для мониторинга и измерения уровня гипоксантина. CeNP и XOD были иммобилизованы на силанизированной бумаге и показали LOD размером 15 мкм с линейным диапазоном до 800 мкм. Низкие значения LOD и широкий линейный диапазон колориметров CeNPs и XOD указывают на высокую чувствительность и точность определения концентрации гипоксантина.

Го и соавторы [45] разработали колориметрический метод определения гипоксантина (Нх) в мясе, основанный на пероксидазной активности суспензии ксантиноксидазы класса I (XOD-ASA) в сульфате аммония. Этот метод обладает хорошей избирательностью, низкой стоимостью и прост в приготовлении. Показано, что LOD составляет 6,93 мкм, и методика показала хорошую линейную зависимость в диапазоне от 20 до 200 мкм. В присутствии H₂O₂ цвет меняется с бесцветного на синий. Низкое значение LOD и широкий линейный диапазон колориметра XOD-ASS демонстрируют высокую чувствительность и точность определения концентрации Нх в мясе. Дин и соавторы [63] разработали портативные гидрогели берлинской лазури с серебряным покрытием (SPB NPs) в сочетании с агарозными гидрогелями для обнаружения триметиламина (ТМА) в креветках и рыбе. Показано, что линейный диапазон составляет от 0,21 до 0,54 промилле. Использование смартфона и ручной тепловизионной камеры значительно повышает мобильность и удобство наблюдения на месте. Узкий линейный диапазон колориметра SPB NPs указывает на высокую точность определения и измерения концентрации ТМА в креветках и рыбе. Нереактивный колориметр имеет низкий LOD и не имеет определенного линейного диапазона, что указывает на высокую чувствительность при обнаружении гипоксантина в образцах мяса.

В таблице 1 показаны тенденции в области оптических биосенсоров для определения свежести мяса и его аналитических свойств в пищевой промышленности.

Таблица 1

Последние тенденции в области оптических биосенсоров для определения свежести мяса и их аналитических характеристик в пищевой промышленности [61–66]

Датчик	Метод обнаружения	Наноматериалы	Образец	Анализируемый
1	2	3	4	5
Флуоресцентный-TPE-HPro/XO	колориметрический	–	рыба, мясо	Нх
O-CDS	колориметрический	углеродные точки	рыба	Нх
XOD-ASS	флуоресценция	–	рыба, мясо	Нх

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
Флуоресцентные-PtNPs	флуоресценция	наночастицы платины	рыба, креветки, кальмары	Hx
Флуоресцентный-NH ₂ -Cu-MOF наночастица	флуоресценция	нанолистовые металло-органические каркасы (MOF)	рыба, мясо	Hx
ДНК-F / GO	флуоресценция	оксид графена (GO)	говядина	АТР
Cys-CuNCs	флуоресценция	нанокластеры меди	рыба	Hx
Наноматериалы XOD@ZnO	колориметрический	наноматериалы из оксида цинка (ZnO)	рыба	Ха
Ионы серебра и β-D-GP	волоконно-оптический	–	рыба, мясо	ВAs
AgP	колориметрический	нанопластины серебра (AgP)	рыба, мясо	Ха
Бумажный колориметрический биосенсор	флуоресценция	–	говядина, свина, рыба	Hx
Совместное добавление g-C ₃ N ₄	колориметрический	–	рыба	Hx
XO / NBT / золь-гель биогидрид	колориметрический	–	рыба тилапия	Hx
CeNPs / XOD /silanized paper	колориметрический	наночастицы оксида церия (CENP)	разложившаяся рыба	Hx
SPB NPS / агарозный гидрогель	флуоресценция/колориметрия	наночастицы берлинской лазури, легированные серебром (SPB NPs)	креветки, рыба	TMA
Колориметрические наностержни СТАВ-Au	флуоресценция	золотые наностержни (GNR)	рыба, мясо	Hx

В целом биосенсоры, основанные на нанотехнологиях, как правило, имеют более низкие показатели LOD по сравнению с традиционными методами. Например, содержание ксантина в мясе рыбы, по данным амперометрии (XODNPs/Au), составляет 0,01 мкг, в то время как содержание ксантина, по данным ВЭЖХ-УФ, составляет 0,0774 мг/л. Аналогично содержание гипоксантина в рыбе составляет 3,93 мкг при использовании наночастиц NH-флуоресценции 2 Cu MOF, тогда как содержание гипоксантина составляет 0,0555 мг / л при использовании ВЭЖХ-УФ (на основе табл. 2). Этот более низкий LOD может сделать биосенсоры на основе нанотехнологий более подходящими для определения следовых концентраций анализируемых веществ.

В таблице 2 показаны аналитические свойства традиционных методов и биосенсоров на основе нанотехнологий.

Таблица 2

Сравнение аналитических характеристик традиционных методов и биосенсоров на основе нанотехнологий

Метод анализа	Образец	Анализируемый	Линейный диапазон	LOD-предел обнаружения	Ссылка
1	2	3	4	5	6
Традиционные					
ВЭЖХ-DAD Высокочувствительная жидкостная хроматография	коровье молоко	аллантоин, мочевая кислота, Ха, Hx	3,125–100 мкг/мл	0,74 мкг/мл 0,16 мкг/мл 0,09 мкг/мл 0,14 мкг/мл	[10]

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5	6
Au-PEDOT-fMWCNT/GCE	мясо рыбы	UA Ха Нх	0,1–800 мкм 0,05–175 мкм 0,1–150 мкм	199,3 нМ 24,1 нМ 90,5 нМ	[14]
ВЭЖХ-УФ	морская рыба	аденин, гуанин, Нх, Ха	0,1–300 мг/л	0,0774 мг/л 0,0178 мг/л 0,0118 мг/л 0,0555 мг/л	[33]
ВЭЖХ-УФ	сырые анчоусы	аденин, гуанин, Нх, Ха	–	–	[37]
ВЭЖХ-УФ	рыба, моллюски	аденин, гуанин, Нх, Ха	0,05–300 мг/л	0,02 мг/л 0,03 мг/л 0,06 мг/л 0,10 мг/л	[39]
UHPLC-MS	сыворотка	23 производных пурина	0,002–11,2 мкг/мл	0,05–6,3 нг/мл	[41]
ВЭЖХ-VWD	куриный бульон по-китайски	аденин, гуанин, Нх, Ха, мочевая кислота	0,05–100 мг/л	0,66 мкг/л 0,64 мкг/л 0,58 мкг/л 1,14 мкг/л 1,71 мкг/л	[63]
Биосенсор на основе нанотехнологий					
Амперометрия (XODNPs/Au)	мясо, рыба	Ха	0,01–1,0 мкм	0,01 мкм	[54]
Электрод XO/Poly (l-Asp)/MWCNT/GCE	мясо, рыба	Ха	0,001–0,004 мкм	$3,5 \times 10^{-4}$ мкм	[56]
Флуоресцентный-NH ₂ -Cu-MOF нанолит	рыба	Нх	10–2000 мкм	3,93 мкм	[64]
CeNPs/XOD/silanized paper	разложившаяся рыба	Нх	800 мкм	15 мкм	[62]

Примечание. Нх – гипоксантин; Ха – ксантин; UA – мочевая кислота.

Традиционные методы, как и биосенсоры на основе нанотехнологий, обладают хорошей чувствительностью и точностью при обнаружении в образцах мяса различных анализируемых веществ, но существуют некоторые различия в их аналитических свойствах. Биосенсоры на основе нанотехнологий, как правило, имеют более широкий линейный диапазон и более низкие пределы обнаружения по сравнению с традиционными методами. Это может способствовать определению более широкого диапазона концентраций анализируемых веществ или компонентов. Однако важно отметить, что выбор метода в конечном счете зависит от конкретных требований и ограничений области применения, и оба типа методов имеют свои преимущества и ограничения.

Заключение

Определение свежести пищевых продуктов, в том числе мяса и мясопродуктов, остается актуальным направлением научных исследований пищевой отрасли. Существуют общепринятые методы исследований на основании органолептических, физико-химических и микробиологических показателей. Находят определенное применение в идентификации веществ – критериев свежести пищевой продукции – инструментальные методы. Особенно развиваются новые методы по определению свежести мяса на основе биосенсоров и протеомики.

Библиография

1. Бурханова А.Г., Баженова Б.А., Егорова Р.А. и др. Исследование хранимостпособности рубленых полуфабрикатов с введением лука угловатого *Allium Angulosum L.* // Вестник ВСГУТУ. – 2022. – № 1 (84). – С. 5–14.
2. Егорова Р.А., Баженова Б.А., Бурханова А.Г. и др. Влияние лука угловатого *Allium Angulosum L.* на процесс окисления разных видов животного жира при хранении // Вестник ВСГУТУ. – 2020. – № 1 (76). – С. 26–36.
3. Chen J., Kong Q., Sun Z. et al. Freshness analysis based on lipidomics for farmed Atlantic salmon (*Salmo salar L.*) stored at different times // Food Chem. – 2022. – N 373. – P. 131564.
4. Zhang Z., Kwok R.T., Yu Y. et al. Aggregation-induced emission luminogen-based fluorescence detection of hypoxanthine: A probe for biomedical diagnosis of energy metabolism-related conditions // J. Mater. Chem. B. – 2018. – N 6. – P. 4575–4578.
5. Guo X., Wang X., Huang D. et al. Method study on determination of total purine content in fish meat by diazotization reaction combined with SERS // LWT. – 2020. – N 123. – P. 109027.
6. Jia W., Fan Z., Shi Q. et al. LC-MS-based metabolomics reveals metabolite dynamic changes during irradiation of goat meat. Int. // Food Res. J. – 2021. – N 150. – P. 110721.
7. Daldal Y.D., Demiralay E.Ç. Chromatographic and UV–visible spectro-photometric pKa determination of some purine antimetabolites // J. Mol. Liq. – 2020. – N 317. – P. 113930.
8. Mathew M.R., Kumar K.G. Poly Amino Hydroxy Naphthalene Sul-phonic Acid) Modified Glassy Carbon Electrode // An Effective Sensing Platform for the Simultaneous Determination of Xanthine and Hypoxanthine // J. Electrochem. Soc. – 2020. – N 167. – P. 047519.
9. Dervisevic M., Dervisevic E., Senel M. Recent progress in nanomaterial-based electrochemical and optical sensors for hypoxanthine and xanthine // A review. Mikrochim. Acta. – 2019. – N 186. – P. 749.
10. Vlassa M., Filip M., Dragomir C. Simultaneous quantifications of four purine derivatives biomarkers in cow milk by SPEH PLC-DAD // Czech J. Food Sci. – 2021. – N 39. – P. 122–130.
11. Nanda P.K., Bhattacharya D., Das J.K. et al. Emerging Role of Biosensors and Chemical Indicators to Monitor the Quality and Safety of Meat and Meat Products // Chemosens. – 2022. – N 10. – P. 322.
12. Thakur D., Pandey C.M., Kumar D. Highly Sensitive Enzymatic Bio-sensor Based on Polyaniline-Wrapped Titanium Dioxide Nanohybrid for Fish Freshness Detection // Appl. Biochem. Biotechnol. – 2022. – N 194. – P. 3765–3778.
13. Tripathi A., Elias A.L., Jemere A.B. et al. Amperometric Determination of Xanthine Using Nanostructured NiO Electrodes Loaded with Xanthine Oxidase // ACS Food Sci. Technol. – 2022. – N 2. – P. 1307–1317.
14. Sen S., Sarkar P. A simple electrochemical approach to fabricate functionalized MWCNT-nanogold decorated PEDOT nanohybrid for simultaneous quantification of uric acid, xanthine and hypoxanthine // Anal. Chim. Acta. – 2020. – N 1114. – P. 15–28.
15. Wang G., Sun J., Yao Y. et al. Detection of Inosine Monophosphate (IMP) in meat using double-enzyme sensor // Food Anal. Methods. – 2020. – N 13. – P. 420–432.
16. Zhang Y., Gao X., Ye Y. et al. Fe-Doped polydopamine nanoparticles with peroxidase-mimicking activity for the detection of hypoxanthine related to meat freshness // Analyst. – 2022. – N 147. – P. 956–964.
17. Song D., Chen Q., Zhai C. et al. Label-Free ZnIn₂S₄/UiO-66-NH₂ Modified Glassy Carbon Electrode for Electrochemically Assessing Fish Freshness by Monitoring Xanthine and Hypoxanthine // Chemosens. – 2022. – N 10. – P. 158.
18. Liu R., Warner R.D., Zhou G. et al. Contribution of nitric oxide and protein S-nitrosylation to variation in fresh meat quality // Meat Sci. – 2018. – N144. – P. 135–148.
19. Cenci-Goga B.T., Iulietto M.F., Sechi P. et al. New trends in meat packaging // Microbiol. Res. – 2020. N 11. – P. 56–67.
20. Mohammed H.H.H., Jin G., Ma M. et al. Comparative characterization of proximate nutritional compositions, microbial quality and safety of camel meat in relation to mutton, beef, and chicken // LWT. – 2020. – N 118. – P. 108714.
21. Johnson J., Atkin D., Lee K. et al. Determining meat freshness using electrochemistry: Are we ready for the fast and furious? // Meat Sci. – 2019. – N 150. – P. 40–46.

22. *Álvarez S., MullennA.M., Hamill R. et al.* Dry-aging of beef as a tool to improve meat quality. Impact of processing conditions on the technical and organoleptic meat properties // *Adv. Food Nutr. Res.* – 2021. – N 95. – P. 97–130.
23. *Rey A.I., Menoyo D., Segura J. et al.* Combination of dietary glycaemic index and fasting time prior to slaughter as strategy to modify quality of pork // *Meat Sci.* – 2020. – N 161. – P. 108013.
24. *Chauhan S.S., England E.M.* Postmortem glycolysis and glycogenolysis: Insights from species comparisons // *Meat Sci.* – 2018. – N 144. – P. 118–126.
25. *Lin W.C., He Y.M., Shi C. et al.* ATP catabolism and bacterial succession in postmortem tissues of mud crab (*Scylla paramamosain*) and their roles in freshness // *Int. Food Res. J.* – 2022. – N 155. – P. 110992.
26. *Rongsheng Z., Huaizhong W., Song L. et al.* Deposition Pattern of Inosine Monophosphate (IMP) in Pig Muscle during Cold Storage // *Anim. Feed Sci.* – 2017. – N 9. – P. 197–218.
27. *Feng X., Moon, S.H., Lee H.Y. et al.* Effect of irradiation on the degradation of nucleotides in turkey meat // *LWT.* – 2016. – N 73. – P. 88–94.
28. *Hong H., Regenstein J.M., Luo Y.* The importance of ATP-related compounds for the freshness and flavor of post-mortem fish and shellfish muscle: A review. *Crit. Rev // Food Sci. Nutr.* – 2017. – N 57. – P. 1787–1798.
29. *Ebata K., Yamashita Y., Inohara K. et al.* Evaluation of Muscle Post-mortem Changes of Japanese Anchovy *Engraulis japonicus* and Round Herring *Etrumeus teres* and Recovery of ATP Concentration of Japanese Anchovy Following Brief Rest in a Fish Cage // *J. Fish. Eng.* – 2020. – N 56. – P. 149–158.
30. *Huang Z., Zhang J., Gu Y. et al.* Research progress on inosine monophosphate deposition mechanism in chicken muscle // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* – 2022. – N 62. – P. 1062–1078.
31. *Pierini G.D., Robledo S.N., Zon M.A. et al.* Development of an electroanalytical method to control quality in fish samples based on an edge plane pyrolytic graphite electrode. Simultaneous determination of hypoxanthine, xanthine and uric acid // *Microchem. J.* – 2018. – N 138. – P. 58–64.
32. *Karim N.U., Kennedy J.T., Linton M. et al.* Determination of nucleotide and enzyme degradation in haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) and herring (*Clupea harengus*) after high pressure processing // *Peer J.* – 2019. – N 7. – P. 7527.
33. *Li J., Zhou G., Xue P. et al.* Spoilage microbes' effect on freshness and IMP degradation in sturgeon fillets during chilled storage // *Food Biosci.* – 2021. – N 41. – P. 101008.
34. *Min J.G., Joung B.C., Jung W.Y.* Postmortem Changes in Spinal Cord-damaged Olive Flounder (*Paralichthys olivaceus*) // *J. Food Nutr. Res.* – 2019. – N 7. – P. 500–505.
35. *Yoshioka T., Konno Y., Konno K.* Below-zero storage of fish to suppress loss of freshness // *Fish. Sci.* – 2018. – N 85. – P. 601–609.
36. *Felicia W. X. L., Rovina K., Nur'Aqilah N. et al.* Assessing Meat Freshness via Nanotechnology Biosensors: Is the World Prepared for Lightning-Fast Pace Methods? // *Biosensors.* – 2023. – N 13. – P. 217.
37. *Takayanagi F., Fukuuchi T., Yamaoka N. et al.* Measurement of the total purine contents and free nucleosides, nucleotides, and purine bases composition in Japanese anchovies (*Engraulis japonicus*) using high-performance liquid chromatography with UV detection // *Nucleos. Nucleat. Nucl.* – 2020. – N 39. – P. 1458–1464.
38. *Qu X., Sui J., Mi N. et al.* Determination of four different purines and their content change in seafood by high-performance liquid chromatography // *J. Sci. Food Agric.* – 2017. – N 97. – P. 520–525.
39. *Felisiak K., Szymczak M., Kołakowski E.* Identification of non-protein nitrogen compounds separated by CZE without derivatization from TCA extract from salted herring meat // *J. Food Compos. Anal.* – 2019. – N 77. – P. 108–114.
40. *Ali N.S.M., Zabidi A.R., Manap M.N.A. et al.* Effect of different slaughtering methods on metabolites of broiler chickens using Ultra High-Performance Liquid Chromatography-Time of Flight-Mass Spectrometry (UHPLC-TOF-MS) // *Food Res.* – 2020. – N 4. – P. 133–138.
41. *Zheng Y., Li X., Chen X. et al.* Simultaneous determination of amino acids, purines and derivatives in serum by ultrahigh-performance liquid chromatography/tandem mass spectrometry // *RCM.* – 2019. – N 33. – P. 81–88.
42. *Ueda S., Yamanoue M., Sirai Y. et al.* Exploring the Characteristic Aroma of Beef from Japanese Black Cattle (Japanese Wagyu) via Sensory Evaluation and Gas Chromatography-Olfactometry // *Metabolites.* – 2021. – N 11. – P. 56.
43. *Chang W.C.W., Wu H.Y., Yeh Y. et al.* Untargeted foodomics strategy using high-resolution mass spectrometry reveals potential indicators for fish freshness // *Anal. Chim. Acta.* – 2020. – N 1127. – P. 98–105.

44. *Dibirasulaev M., Belozеров G., Arkhipov L. et al.* Quick and simple spectrophotometric method of identification of the thermal state of meat on the basis of composition and content of free nucleotides // *Food Sci. Nutr.* – 2018. – N 9. – P. 572–583.
45. *Guo C., You S., Li C. et al.* One-Step and Colorimetric Detection of Fish Freshness Indicator Hypoxanthine Based on the Peroxidase Activity of Xanthine Oxidase Grade I Ammonium Sulfate Suspension. *Front // Microbiol.* – 2021 – N 12. – P. 791227.
46. *Prajapati S., Padhan B., Amulyasai B. et al.* Nanotechnology-based sensors. *Biopolym // Based Formul.* – 2020. – N 1. – P. 237–262.
47. *Bashir O., Bhat S.A., Basharat A. et al.* Nano-engineered materials for sensing food pollutants: Technological advancements and safety issues // *Chemosphere.* – 2022. – N 292. – P. 133320.
48. *Erna K.H., Felicia W.X.L., Rovina K. et al.* Development of curcumin/rice starch films for sensitive detection of hypoxanthine in chicken and fish meat // *Carbohydr. Polym.* – 2022. – N 3. – P. 100189.
49. *Bonnet C., Bouamra-Mechemache Z., Réquillart V. et al.* Regulating meat consumption to improve health, the environment and animal welfare // *Food Policy.* – 2020. – N 97. – P. 101847.
50. *Erna K.H., Rovina K., Mantihal S. Current.* Detection Techniques for Monitoring the Freshness of Meat-Based Products: A Review // *J. Package. Technol. Res.* – 2021. – N 5. – P. 127–141.
51. *Albelda J.A., Uzunoglu A., Santos G.N.C. et al.* Graphene-titanium dioxide nanocomposite based hypoxanthine sensor for assessment of meat freshness // *Biosens. Bioelectron.* – 2017. – N 89. – P. 518–524.
52. *Boluda A., Casado C.M., Alonso B. et al.* Efficient Oxidase Biosensors Based on Bioelectrocatalytic Surfaces of Electrodeposited Ferrocenyl Polycyclosiloxanes – Pt Nanoparticles // *Chemosensors.* – 2021. – N 9. – P. 81.
53. *Furuhashi M.* New insights into purine metabolism in metabolic diseases: Role of xanthine oxidoreductase activity // *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* – 2020, – N 319, E827–E834.
54. *Joon A., Ahlawat J., Aggarwal V. et al.* An improved amperometric determination of xanthine with xanthine oxidase nanoparticles for testing of fish meat freshness // *Sens. Bio-Sens. Res.* – 2021. – N 33. – P. 100437.
55. *Ghanbari K., Nejabati F.* Ternary nanocomposite-based reduced graphene oxide/chitosan/Cr2O3 for the simultaneous determination of dopamine, uric acid, xanthine, and hypoxanthine in fish meat // *Anal. Methods.* – 2020. – N 12. – P. 1650–1661.
56. *Yazdanparast S., Benvidi A., Abbasi S. et al.* Enzyme-based ultrasensitive electrochemical biosensor using poly (l-aspartic acid)/MWCNT bio-nanocomposite for xanthine detection: A meat freshness marker // *Microchem. J.* – 2019. – N 149. – P. 104000.
57. *Liu Z., Zhong Y., Hu Y. et al.* Fluorescence strategy for sensitive detection of adenosine triphosphate in terms of evaluating meat freshness // *Food Chem.* – 2019. – N 270. – P. 573–578.
58. *Chen J., Lu Y., Yan F. et al.* A fluorescent biosensor based on catalytic activity of platinum nanoparticles for freshness evaluation of aquatic products // *Food Chem.* – 2020. – N 310. – P. 125922.
59. *Mooltongchun M., Teepoo S.* A simple and cost-effective microfluidic paper-based biosensor analytical device and its application for hypoxanthine detection in meat samples // *Food Anal. Methods.* – 2019 – N 12. – P. 2690–2698.
60. *Wang X., Lin Z.Z., Hong C.Y. et al.* Colorimetric detection of hypoxanthine in aquatic products based on the enzyme mimic of cobalt-doped carbon nitride // *New J. Chem.* – 2021. – N 45. – P. 18307–18314.
61. *Mustafa F., Andreescu S.* Based enzyme biosensor for one-step detection of hypoxanthine in fresh and degraded fish // *ACS Sens.* – 2020. – N 5. – P. 4092–4100.
62. *Mustafa F., Othman A., Andreescu S.* Cerium oxide-based hypoxanthine biosensor for Fish spoilage monitoring // *Sens. Actuators B Chem.* – 2021. – N 332. – P. 129435.
63. *Ding N., Dong S., Zhang Y. et al.* Portable silver-doped prussian blue nanoparticle hydrogels for colorimetric and photothermal monitoring of shrimp and fish freshness // *Sens. Actuators B Chem.* – 2022. – N 363. – P. 131811.
64. *Garg D., Singh M., Verma N.* Review on recent advances in fabrication of enzymatic and chemical sensors for hypoxanthine // *Food Chem.* – 2021. – N 375. – P. 131839.
65. *Mu G., Luan F., Xu L. et al.* Determination of purines in soybean milk by capillary electrophoresis in comparison with high performance liquid chromatography // *Anal. Methods.* – 2012. – N 4. – P. 3386–3391.
66. *Hu S., Yan J., Huang X. et al.* A sensing platform for hypoxanthine detection based on aminofunctionalized metal organic framework nanosheet with peroxidase mimic and fluorescence properties // *Sens. Actuators B Chem.* – 2018. – N 267. – P. 312–319.

Bibliography

1. *Burkhanova A.G., Bazhenova B.A., Egorova R.A. et al.* Study of storage capacity of chopped semi-finished products with the introduction of angular onions *Allium Angulosum L.* // *ESSUTM Bulletin.* – 2022. – N 1 (84). – P. 5–14.
2. *Egorova R.A., Bazhenova B.A., Burkhanova A.G. et al.* Influence of angular onion *Allium Angulosum L.* on the oxidation process of different types of animal fat during storage // *ESSUTM Bulletin.* – 2020. – N 1 (76). – P. 26–36.
3. *Chen J., Kong Q., Sun Z., Liu J.* Freshness analysis based on lipidomics for farmed Atlantic salmon (*Salmo salar L.*) stored at different times // *Food Chem.* – 2022. – Vol. 373. – P. 131564.
4. *Zhang Z., Kwok R.T., Yu Y. et al.* Aggregation-induced emission luminogen-based fluorescence detection of hypoxanthine: A probe for biomedical diagnosis of energy metabolism-related conditions // *J. Mater. Chem. B.* – 2018. – N 6. – P. 4575–4578.
5. *Guo X., Wang X., Huang D. et al.* Method study on determination of total purine content in fish meat by diazotization reaction combined with SERS // *LWT.* – 2020. – N 123. – P. 109027.
6. *Jia W., Fan Z., Shi Q. et al.* LC-MS-based metabolomics reveals metabolite dynamic changes during irradiation of goat meat. *Int. J. Food Res. J.* – 2021. – N 150. – P. 110721.
7. *Daldal Y.D., Demiralay E.Ç.* Chromatographic and UV–visible spectro-photometric pKa determination of some purine antimetabolites // *J. Mol. Liq.* – 2020. – N 317. – P. 113930.
8. *Mathew M.R., Kumar K.G.* Poly Amino Hydroxy Naphthalene Sul-phonic Acid) Modified Glassy Carbon Electrode // An Effective Sensing Platform for the Simultaneous Determination of Xanthine and Hypoxanthine // *J. Electrochem. Soc.* – 2020. – N 167. – P. 047519.
9. *Dervisevic M., Dervisevic E., Senel M.* Recent progress in nanomaterial-based electrochemical and optical sensors for hypoxanthine and xanthine // A review. *Mikrochim. Acta.* – 2019. – N 186. – P. 749.
10. *Vlassa M., Filip M., Dragomir C.* Simultaneous quantifications of four purine derivatives biomarkers in cow milk by SPEH PLC-DAD // *Czech J. Food Sci.* – 2021. – N 39. – P. 122–130.
11. *Nanda P.K., Bhattacharya D., Das J.K. et al.* Emerging Role of Biosensors and Chemical Indicators to Monitor the Quality and Safety of Meat and Meat Products // *Chemosens.* – 2022. – N 10. – P. 322.
12. *Thakur D., Pandey C.M., Kumar D.* Highly Sensitive Enzymatic Bio-sensor Based on Polyaniline-Wrapped Titanium Dioxide Nanohybrid for Fish Freshness Detection // *Appl. Biochem. Biotechnol.* – 2022. – N 194. – P. 3765–3778.
13. *Tripathi A., Elias A.L., Jemere A.B. et al.* Amperometric Determination of Xanthine Using Nanostructured NiO Electrodes Loaded with Xanthine Oxidase // *ACS Food Sci. Technol.* – 2022. – N 2. – P. 1307–1317.
14. *Sen S., Sarkar P.* A simple electrochemical approach to fabricate functionalized MWCNT-nanogold decorated PEDOT nanohybrid for simultaneous quantification of uric acid, xanthine and hypoxanthine // *Anal. Chim. Acta.* – 2020. – N 1114. – P. 15–28.
15. *Wang G., Sun J., Yao Y. et al.* Detection of Inosine Monophosphate (IMP) in meat using double-enzyme sensor // *Food Anal. Methods.* – 2020. – N 13. – P. 420–432.
16. *Zhang Y., Gao X., Ye Y. et al.* Fe-Doped polydopamine nanoparticles with peroxidase-mimicking activity for the detection of hypoxanthine related to meat freshness // *Analyst.* – 2022. – N 147. – P. 956–964.
17. *Song D., Chen Q., Zhai C. et al.* Label-Free ZnIn₂S₄/UiO-66-NH₂ Modified Glassy Carbon Electrode for Electrochemically Assessing Fish Freshness by Monitoring Xanthine and Hypoxanthine // *Chemosens.* – 2022. – N 10. – P. 158.
18. *Liu R., Warner R.D., Zhou G. et al.* Contribution of nitric oxide and protein S-nitrosylation to variation in fresh meat quality // *Meat Sci.* – 2018. – N144. – P. 135–148.
19. *Cenci-Goga B.T., Iulietto M.F., Sechi P. et al.* New trends in meat packaging // *Microbiol. Res.* – 2020. N 11. – P. 56–67.
20. *Mohammed H.H.H., Jin G., Ma M. et al.* Comparative characterization of proximate nutritional compositions, microbial quality and safety of camel meat in relation to mutton, beef, and chicken // *LWT.* – 2020. – N 118. – P. 108714.
21. *Johnson J., Atkin D., Lee K. et al.* Determining meat freshness using electrochemistry: Are we ready for the fast and furious? // *Meat Sci.* – 2019. – N 150. – P. 40–46.

22. *Álvarez S., MullennA.M., Hamill R. et al.* Dry-aging of beef as a tool to improve meat quality. Impact of processing conditions on the technical and organoleptic meat properties // *Adv. Food Nutr. Res.* – 2021. – N 95. – P. 97–130.
23. *Rey A.I., Menoyo D., Segura J. et al.* Combination of dietary glycaemic index and fasting time prior to slaughter as strategy to modify quality of pork // *Meat Sci.* – 2020. – N 161. – P. 108013.
24. *Chauhan S.S., England E.M.* Postmortem glycolysis and glycogenolysis: Insights from species comparisons // *Meat Sci.* – 2018. – N 144. – P. 118–126.
25. *Lin W.C., He Y.M., Shi C. et al.* ATP catabolism and bacterial succession in postmortem tissues of mud crab (*Scylla paramamosain*) and their roles in freshness // *Int. Food Res. J.* – 2022. – N 155. – P. 110992.
26. *Rongsheng Z., Huaizhong W., Song L. et al.* Deposition Pattern of Inosine Monophosphate (IMP) in Pig Muscle during Cold Storage // *Anim. Feed Sci.* – 2017. – N 9. – P. 197–218.
27. *Feng X., Moon, S.H., Lee H.Y. et al.* Effect of irradiation on the degradation of nucleotides in turkey meat // *LWT.* – 2016. – N 73. – P. 88–94.
28. *Hong H., Regenstein J.M., Luo Y.* The importance of ATP-related compounds for the freshness and flavor of post-mortem fish and shellfish muscle: A review. *Crit. Rev // Food Sci. Nutr.* – 2017. – N 57. – P. 1787–1798.
29. *Ebata K., Yamashita Y., Inohara K. et al.* Evaluation of Muscle Post-mortem Changes of Japanese Anchovy *Engraulis japonicus* and Round Herring *Etrumeus teres* and Recovery of ATP Concentration of Japanese Anchovy Following Brief Rest in a Fish Cage // *J. Fish. Eng.* – 2020. – N 56. – P. 149–158.
30. *Huang Z., Zhang J., Gu Y. et al.* Research progress on inosine monophosphate deposition mechanism in chicken muscle // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* – 2022. – N 62. – P. 1062–1078.
31. *Pierini G.D., Robledo S.N., Zon M.A. et al.* Development of an electroanalytical method to control quality in fish samples based on an edge plane pyrolytic graphite electrode. Simultaneous determination of hypoxanthine, xanthine and uric acid // *Microchem. J.* – 2018. – N 138. – P. 58–64.
32. *Karim N.U., Kennedy J.T., Linton M. et al.* Determination of nucleotide and enzyme degradation in haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) and herring (*Clupea harengus*) after high pressure processing // *Peer J.* – 2019. – N 7. – P. 7527.
33. *Li J., Zhou G., Xue P. et al.* Spoilage microbes' effect on freshness and IMP degradation in sturgeon fillets during chilled storage // *Food Biosci.* – 2021. – N 41. – P. 101008.
34. *Min J.G., Joung B.C., Jung W.Y.* Postmortem Changes in Spinal Cord-damaged Olive Flounder (*Paralichthys olivaceus*) // *J. Food Nutr. Res.* – 2019. – N 7. – P. 500–505.
35. *Yoshioka T., Konno Y., Konno K.* Below-zero storage of fish to suppress loss of freshness // *Fish. Sci.* – 2018. – N 85. – P. 601–609.
36. *Felicia W. X. L., Rovina K., Nur'Aqilah N. et al.* Assessing Meat Freshness via Nanotechnology Biosensors: Is the World Prepared for Lightning-Fast Pace Methods? // *Biosensors.* – 2023. – N 13. – P. 217.
37. *Takayanagi F., Fukuuchi T., Yamaoka N. et al.* Measurement of the total purine contents and free nucleosides, nucleotides, and purine bases composition in Japanese anchovies (*Engraulis japonicus*) using high-performance liquid chromatography with UV detection // *Nucleos. Nucleat. Nucl.* – 2020. – N 39. – P. 1458–1464.
38. *Qu X., Sui J., Mi N. et al.* Determination of four different purines and their content change in seafood by high-performance liquid chromatography // *J. Sci. Food Agric.* – 2017. – N 97. – P. 520–525.
39. *Felisiak K., Szymczak M., Kołakowski E.* Identification of non-protein nitrogen compounds separated by CZE without derivatization from TCA extract from salted herring meat // *J. Food Compos. Anal.* – 2019. – N 77. – P. 108–114.
40. *Ali N.S.M., Zabidi A.R., Manap M.N.A. et al.* Effect of different slaughtering methods on metabolites of broiler chickens using Ultra High-Performance Liquid Chromatography-Time of Flight-Mass Spectrometry (UHPLC-TOF-MS) // *Food Res.* – 2020. – N 4. – P. 133–138.
41. *Zheng Y., Li X., Chen X. et al.* Simultaneous determination of amino acids, purines and derivatives in serum by ultrahigh-performance liquid chromatography/tandem mass spectrometry // *RCM.* – 2019. – N 33. – P. 81–88.
42. *Ueda S., Yamanoue M., Sirai Y. et al.* Exploring the Characteristic Aroma of Beef from Japanese Black Cattle (Japanese Wagyu) via Sensory Evaluation and Gas Chromatography-Olfactometry // *Metabolites.* – 2021. – N 11. – P. 56.
43. *Chang W.C.W., Wu H.Y., Yeh Y. et al.* Untargeted foodomics strategy using high-resolution mass spectrometry reveals potential indicators for fish freshness // *Anal. Chim. Acta.* – 2020. – N 1127. – P. 98–105.

44. *Dibirasulaev M., Belozеров G., Arkhipov L. et al.* Quick and simple spectrophotometric method of identification of the thermal state of meat on the basis of composition and content of free nucleotides // *Food Sci. Nutr.* – 2018. – N 9. – P. 572–583.
45. *Guo C., You S., Li C. et al.* One-Step and Colorimetric Detection of Fish Freshness Indicator Hypoxanthine Based on the Peroxidase Activity of Xanthine Oxidase Grade I Ammonium Sulfate Suspension. *Front // Microbiol.* – 2021 – N 12. – P. 791227.
46. *Prajapati S., Padhan B., Amulyasai B. et al.* Nanotechnology-based sensors. *Biopolym // Based Formul.* – 2020. – N 1. – P. 237–262.
47. *Bashir O., Bhat S.A., Basharat A. et al.* Nano-engineered materials for sensing food pollutants: Technological advancements and safety issues // *Chemosphere.* – 2022. – N 292. – P. 133320.
48. *Erna K.H., Felicia W.X.L., Rovina K. et al.* Development of curcumin/rice starch films for sensitive detection of hypoxanthine in chicken and fish meat // *Carbohydr. Polym.* – 2022. – N 3. – P. 100189.
49. *Bonnet C., Bouamra-Mechemache Z., Réquillart V. et al.* Regulating meat consumption to improve health, the environment and animal welfare // *Food Policy.* – 2020. – N 97. – P. 101847.
50. *Erna K.H., Rovina K., Mantihal S. Current.* Detection Techniques for Monitoring the Freshness of Meat-Based Products: A Review // *J. Package. Technol. Res.* – 2021. – N 5. – P. 127–141.
51. *Albelda J.A., Uzunoglu A., Santos G.N.C. et al.* Graphene-titanium dioxide nanocomposite based hypoxanthine sensor for assessment of meat freshness // *Biosens. Bioelectron.* – 2017. – N 89. – P. 518–524.
52. *Boluda A., Casado C.M., Alonso B. et al.* Efficient Oxidase Biosensors Based on Bioelectrocatalytic Surfaces of Electrodeposited Ferrocenyl Polycyclosiloxanes – Pt Nanoparticles // *Chemosensors.* – 2021. – N 9. – P. 81.
53. *Furuhashi M.* New insights into purine metabolism in metabolic diseases: Role of xanthine oxidoreductase activity // *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.* – 2020, – N 319, E827–E834.
54. *Joon A., Ahlawat J., Aggarwal V. et al.* An improved amperometric determination of xanthine with xanthine oxidase nanoparticles for testing of fish meat freshness // *Sens. Bio-Sens. Res.* – 2021. – N 33. – P. 100437.
55. *Ghanbari K., Nejabati F.* Ternary nanocomposite-based reduced graphene oxide/chitosan/Cr2O3 for the simultaneous determination of dopamine, uric acid, xanthine, and hypoxanthine in fish meat // *Anal. Methods.* – 2020. – N 12. – P. 1650–1661.
56. *Yazdanparast S., Benvidi A., Abbasi S. et al.* Enzyme-based ultrasensitive electrochemical biosensor using poly (l-aspartic acid)/MWCNT bio-nanocomposite for xanthine detection: A meat freshness marker // *Microchem. J.* – 2019. – N 149. – P. 104000.
57. *Liu Z., Zhong Y., Hu Y. et al.* Fluorescence strategy for sensitive detection of adenosine triphosphate in terms of evaluating meat freshness // *Food Chem.* – 2019. – N 270. – P. 573–578.
58. *Chen J., Lu Y., Yan F. et al.* A fluorescent biosensor based on catalytic activity of platinum nanoparticles for freshness evaluation of aquatic products // *Food Chem.* – 2020. – N 310. – P. 125922.
59. *Mooltongchun M., Teepoo S.* A simple and cost-effective microfluidic paper-based biosensor analytical device and its application for hypoxanthine detection in meat samples // *Food Anal. Methods.* – 2019 – N 12. – P. 2690–2698.
60. *Wang X., Lin Z.Z., Hong C.Y. et al.* Colorimetric detection of hypoxanthine in aquatic products based on the enzyme mimic of cobalt-doped carbon nitride // *New J. Chem.* – 2021. – N 45. – P. 18307–18314.
61. *Mustafa F., Andreescu S.* Based enzyme biosensor for one-step detection of hypoxanthine in fresh and degraded fish // *ACS Sens.* – 2020. – N 5. – P. 4092–4100.
62. *Mustafa F., Othman A., Andreescu S.* Cerium oxide-based hypoxanthine biosensor for Fish spoilage monitoring // *Sens. Actuators B Chem.* – 2021. – N 332. – P. 129435.
63. *Ding N., Dong S., Zhang Y. et al.* Portable silver-doped prussian blue nanoparticle hydrogels for colorimetric and photothermal monitoring of shrimp and fish freshness // *Sens. Actuators B Chem.* – 2022. – N 363. – P. 131811.
64. *Garg D., Singh M., Verma N.* Review on recent advances in fabrication of enzymatic and chemical sensors for hypoxanthine // *Food Chem.* – 2021. – N 375. – P. 131839.
65. *Mu G., Luan F., Xu L. et al.* Determination of purines in soybean milk by capillary electrophoresis in comparison with high performance liquid chromatography // *Anal. Methods.* – 2012. – N 4. – P. 3386–3391.
66. *Hu S., Yan J., Huang X. et al.* A sensing platform for hypoxanthine detection based on aminofunctionalized metal organic framework nanosheet with peroxidase mimic and fluorescence properties // *Sens. Actuators B Chem.* – 2018. – N 267. – P. 312–319.

4.3.5 – **БИОТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ И БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ (БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)**

DOI 10.53980/24131997_2024_4_36

Н.А. Фролова¹, д-р техн. наук, проф., e-mail: ninelfr@mail.ru

В.В. Верхогуров¹, д-р биол. наук, проф., e-mail: vasilij.verkhoturov@klgtu.ru

Н.В. Шкрабтак², д-р техн. наук, проф., e-mail: mmip2013@mail.ru

Е.Е. Веремей¹, ст. преподаватель, e-mail: e696ee@mail.ru

М.А. Гринчук¹, магистрант, e-mail: mariya.grinchuk@klgtu.ru

¹ Калининградский государственный технический университет, г. Калининград

² Амурский государственный университет, г. Благовещенск

УДК 634.4

**АНАЛИЗ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ
ПЛОДОВ *HIPPOPHAE RHAMNOIDES L.***

*В статье представлен анализ некоторых биоактивных соединений плодов облепихи крушиновидной (*Hippophae rhamnoides L.*), собранной в 2021–2023 гг. на территории Амурской области, в частности пищевых волокон, их фракционного, аминокислотного и полифенольного состава. Было установлено, что плоды *Hippophae rhamnoides L.* являются источником протеина, среднее значение которого в анализируемых образцах составило 18,37 г / 100 мг. Следует также отметить низкий уровень содержания кислотно-детергентного лигнина (5,77 г / 100 г) и гемицеллюлозы (8,46 г / 100 г) и большое содержание полифенолов. Таким образом, проведенные исследования показали, что плоды *Hippophae rhamnoides L.* являются перспективным и богатым физиологически ценным ингредиентом, который можно использовать для создания функциональных продуктов.*

Ключевые слова: протеин, аминокислоты, клетчатка, полифенолы, функциональные продукты, плоды.

N.A. Frolova¹, Dr. Sc. Engineering, Prof.

V.V. Verkhoturov¹, Dr. Sc. Biology, Prof.

N.V. Shkrabtak², Dr. Sc. Engineering, Prof.

E.E. Veremey¹, Senior Lecturer

M.A. Grinchuk¹, master student

¹ Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad

² Amur State University, Blagoveshchensk

**ANALYSIS OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES
OF *HIPPOPHAE RHAMNOIDES L.* FRUIT**

*The article presents an analysis of some bioactive compounds of sea buckthorn fruit (*Hippophae rhamnoides L.*), picked up in 2021–2023 in the Amur region, in particular dietary fibers, their fractional, amino acid and polyphenolic composition. It was found that the fruit of *Hippophae rhamnoides L.* is a source of protein, the average value of which in the analyzed samples was 18.37 g/100 mg. It should also be noted that the content of acid-detergent lignin (5.77 g/100 g) and hemicellulose (8.46 g/100 g) is low, and the content of polyphenols is high. Thus, the studies conducted have shown that fruit of *Hippophae rhamnoides L.* is high-potential and physiologically valuable ingredient that can be used to develop functional products.*

Key words: protein, amino acids, fiber, polyphenols, functional products, fruit.

Введение

Наряду с технологическим прогрессом в мировом сообществе наблюдается тенденция роста числа людей с неинфекционными или хроническими заболеваниями, среди которых наиболее распространенными являются диабет, сердечно-сосудистые, легочные и онкологические заболевания. Такие распространенные факторы окружающей среды, как загрязнение воздуха, воды, высокий уровень стрессовых факторов, физических нагрузок приводят к нарушению гомеостаза организма [1–2]. Рост осведомленности потребителей в вопросах питания стимулирует создание новых продуктов, которые привлекательны с точки зрения не только сенсорных аспектов, но и пищевой ценности и/или свойств, способствующих укреплению здоровья.

По данным Всемирной организации здравоохранения, приблизительно 74 % ежегодных смертей в мире вызваны неинфекционными заболеваниями, из которых сердечно-сосудистые заболевания как следствие избыточной массы тела составляют наибольший процент [3]. Проблемы возникновения таких заболеваний достаточно разнообразны: наследственные факторы, питание, образ жизни и т. д. Одним из современных и перспективных направлений в области нутрициологии является разработка продуктов для здорового питания: понижение калорийности, обогащение антиоксидантами, пищевыми волокнами и т. д.

Для создания многокомпонентных пищевых систем требуется поиск и анализ функциональных ингредиентов на основе природных сырьевых ресурсов, которые содержат уникальный комплекс биологически активных веществ (БАВ). Фитохимические вещества, в частности антиоксиданты, – это биологически активные соединения растительного происхождения, которые обеспечивают защиту здоровья человеческого организма благодаря своим свойствам.

Так, многие лекарственные растения и плодово-ягодное сырье являются отличным источником БАВ, которые традиционно используются в лечебных целях различных народов мира (традиционной, китайской медицине и т. д.). Данные природно-сырьевые ресурсы отличаются высоким содержанием биодоступных питательных веществ, таких как минеральные вещества, витамины, антиоксиданты и т. д., синергетическое действие которых характеризуется иммуностимулирующим, противовоспалительным и противомикробным влиянием [1–3].

В настоящее время рынок функциональных продуктов, оказывающих положительное влияние на здоровье человека, динамично развивается [4]. Хотя ассортимент функциональных продуктов питания и фитохимических веществ постоянно расширяется, спрос на новые продукты постоянно увеличивается.

Облепиха крушиновидная (*Hippophae rhamnoides L.*) содержит много ценных питательных и биологически активных веществ (рис. 1). На протяжении столетий она использовалась в народной медицине. Плоды, мякоть и масло семян облепихи широко используются в питании человека [5–7]. В фармакологической сети доступно облепиховое масло для наружного применения, которое обладает противомикробным и заживляющим действием.



Рисунок 1 – Вид плодов *Hippophae rhamnoides L.*

Современные исследования уже представлены рядом разработок в области изучения химического состава, фармакологической активности и использования различных частей *Hippophae rhamnoides L.* в пищевых технологиях. Анализ отечественных и зарубежных трудов свидетельствует о различном химическом составе, а следовательно, и уровне физиологической активности различных вегетативных частей *Hippophae rhamnoides L.*

Так, например, листья облепихи являются побочным продуктом выращивания облепихи и обычно относятся к отходам [8–10]. Однако не только ягоды облепихи, но и листья этого растения (как свежие, так и сушеные) были признаны ценным источником питательных веществ и биологически активных соединений. В настоящее время наблюдается интересная тенденция в технологиях пищевой промышленности, связанная с переработкой растительных побочных продуктов. Сюда входят, например, выжимки, оставшиеся после прессования сока и семян. Листья облепихи значительно снижают уровень окислительного стресса, отчасти из-за наличия проантоцианидинов [11–14].

Концепция рециклинга представляет собой важную, ориентированную на устойчивость, инновационную практику, способствующую сокращению отходов и эффективному использованию ресурсов. Жом плодов *Hippophae rhamnoides L.* является ценным сырьем не только из-за содержания в них биологически активных соединений и их антиоксидантных свойств, но и потому, что они могут служить источником белка [15].

Анализ современных отечественных и зарубежных литературных источников свидетельствует о перспективности использования плодов *Hippophae rhamnoides L.* в технологиях пищевых продуктов, однако анализ химического состава плодов, произрастающих на территории Амурской области, отличается профилем спектра нутриентов, что зависит в первую очередь от типа, вида почвенного слоя и природно-климатических условий произрастания анализируемых сырьевых ресурсов [3, 4, 6, 9, 12, 13].

Целью данного исследования являлся анализ химического состава плодов *Hippophae rhamnoides L.*

Материалы и методы исследования

Плоды *Hippophae rhamnoides L.* были собраны в Амурской области в 2021–2023 гг. в период полной зрелости ягод (в сентябре). Массовая доля сухих веществ определена методом высушивания до постоянной массы в вакуум-сушильном шкафу. Химический состав БАВ плодов *Hippophae rhamnoides L.* определяли методом ВЭЖХ на приборе Люмахром-350, основанный на разделении веществ в хроматографической колонке с последующим их детектированием в потоке подвижной фазы. Сырой протеин анализировали методом Кьельдаля при помощи полуавтоматической системы дистилляции К1305. Сырую клетчатку определяли с помощью анализатора волокон ANKOM220. Общее содержание фенолов определяли спектрофотометрическим путем окисления в щелочной среде реактивом Фолина – Чокальтеу [11].

Для установления среднестатистических значений полученных результатов эксперименты проведены в трех повторностях с последующей обработкой при помощи t-критерия Стьюдента ($p \leq 0,05$) и обработкой полученных результатов в программе STATISTICA 10.0.

Результаты исследования и их обсуждение

Продукты из плодов *Hippophae rhamnoides L.* являются источником питательных веществ и БАВ, но конкретный сорт и год сбора урожая – это важные факторы, которые влияют на их химический состав.

Содержание основных питательных компонентов в анализируемом сырье представлено в таблице 1. Установлено, что химический состав плодов *Hippophae rhamnoides L.* варьировал в зависимости от природно-климатических условий, которые сопровождалась в 2023 г. обильными осадками в период сбора, а в 2021 г., наоборот, сбор плодов происходил в засушливый период.

Таблица 1

Химический состав плодов *Hippophae rhamnoides L.* ($X \pm m$; $p \leq 0,05$)

Год сбора	Содержание сухих веществ, г / 100 мг	Содержание сырого протеина, г / 100 г сухих веществ	Содержание клетчатки, г / 100 г сухих веществ
2021	94,92±1,12	20,52±0,78	10,58±0,66
2022	95,29±1,32	16,03±0,64	10,42±0,58
2023	93,05±1,02	18,57±0,42	12,01±1,01

Согласно данным, представленным в таблице 1, плоды *Hippophae rhamnoides L.* считаются хорошим источником протеина, среднее содержание которого составило 18,37 г/100 мг. Основными компонентами сухого вещества в плодах *Hippophae rhamnoides L.* являются углеводы, выполняющие многочисленные важные функции в живых организмах. Моносахариды – основной источник энергии для метаболизма человека и животных, а полисахариды служат хранилищами энергии и структурными компонентами. Сырая клетчатка включала сумму волокнистых веществ (целлюлозы, лигнина, гемицеллюлозы и т. д.), устойчивых к ферментам пищеварительного тракта [5, 12].

Функциональность пищевых волокон варьирует в зависимости от химической и физической структуры. Физиологические функции различных пищевых волокон зависят от их физико-химических характеристик, одной из которых является растворимость.

Вещества, входящие в состав пищевых волокон, характеризуются лечебными свойствами, используемыми для снижения риска возникновения ожирения, диабета и склероза. Ожирение является всемирной эпидемией, представляющей собой серьезную проблему для общества, увеличивающей экономическое бремя для систем здравоохранения и являющейся пятой по значимости причиной смерти от сердечно-сосудистых заболеваний и рака в мире.

Следующим этапом работы было определение фракционного состава пищевых волокон кожуры плодов *Hippophae rhamnoides L.* (табл. 2).

Таблица 2

Фракционный состав пищевых волокон кожуры плодов *Hippophae rhamnoides L.* (г / 100 г сухих веществ) ($X \pm m$; $p \leq 0,05$)

Год	Нейтрально-детергентная клетчатка	Кислотно-детергентная клетчатка	Кислотно-детергентный лигнин	Гемицеллюлоза	Целлюлоза
2021	31,15±1,12	21,02±1,42	5,99±0,86	10,72±0,96	14,73±0,88
2022	20,48±1,42	18,44±1,38	6,35±0,62	7,22±0,66	11,99±0,78
2023	20,98±1,18	14,05±1,04	4,97±0,48	7,45±0,62	8,65±0,42

Фракционный состав пищевых волокон кожуры плодов *Hippophae rhamnoides L.* характеризовался низким уровнем содержания кислотно-детергентного лигнина, среднее значение которого составляло примерно 5,77 г / 100 г, и гемицеллюлозы – 8,46 г / 100 г.

Белки состоят из 20 аминокислот. С точки зрения питания аминокислоты делятся на две группы – заменимые и незаменимые. Из 20 аминокислот человек может синтезировать только заменимые аминокислоты. Заменимые аминокислоты синтезируются организмом, но определяются как незаменимые в периоды стресса. Такие незаменимые аминокислоты, как гистидин, изолейцин, лейцин, лизин, метионин, фенилаланин, треонин, триптофан и валин, не могут быть синтезированы клетками человека. Следующим этапом работы явилось исследование аминокислотного состава плодов *Hippophae rhamnoides L.*, результаты которого представлены в таблице 3.

Таблица 3

Аминокислотный состав плодов *Hippophae rhamnoides L.* (г / 100 г белка) ($X \pm m$; $p \leq 0,05$)

Показатель	Год		
	2021	2022	2023
<i>Незаменимые аминокислоты</i>			
Лизин	5,18±0,12	4,01±0,32	5,07±0,42
Метионин	7,96±0,18	7,59±0,18	8,11±0,38
Цистин	1,19±0,66	0,98±0,06	1,25±0,08
Треонин	4,51±0,84	3,12±0,12	4,01±0,12
Изолейцин	3,65±0,14	2,79±0,32	3,15±0,42
Триптофан	0,25±0,08	0,41±0,10	0,39±0,08
Валин	4,41±0,87	3,70±0,68	4,09±0,22
Лейцин	7,21±0,62	4,85±0,44	6,21±0,40
Гистидин	1,99±0,23	1,21±0,12	1,89±0,28
<i>Заменимые аминокислоты</i>			
Аспарагиновая кислота	10,61±0,86	6,22±0,86	8,44±0,68
Серин	4,09±0,23	2,93±0,22	3,55±0,23
Глютаминовая кислота	8,83±0,68	8,92±0,84	9,05±0,38
Пролин	4,82±0,44	3,19±0,42	4,04±0,42
Глицин	5,29±0,66	3,55±0,22	4,48±0,18
Аланин	2,85±0,11	2,94±0,68	3,07±
Аргинин	4,22±0,22	4,67±0,44	4,48±

Проведенные исследования показали, что содержание незаменимых аминокислот за анализируемый период в плодах *Hippophae rhamnoides L.* достаточно высокое.

Далее был изучен полифенольный профиль плодов *Hippophae rhamnoides L.*, результаты которого представлены в таблице 4.

Таблица 4

Полифенольный состав плодов *Hippophae rhamnoides L.*

Показатель	Время удержания, мин.	Содержание, %
<i>Catechin- hexoside</i>	3,34	0,04
Gallocatechine	3,43	0,09
<i>Pedunculagin isomer</i>	3,59	2,79
<i>Catechin- gallocatechin</i>	3,70	0,87
<i>Pedunculagin isomer</i>	3,95	0,05
<i>Pedunculagin</i>	4,01	2,12
(+) - <i>Catechine</i>	4,05	0,34
<i>Pterocarinin A</i>	4,12	0,09
<i>Pterocarinin A izomer</i>	4,18	2,01
<i>Pterocarinin A izomer</i>	4,22	2,62
<i>Casuarinin</i>	4,32	8,42
<i>Chebulagic acid</i>	4,52	10,34
<i>Stachyurin</i>	4,67	0,69
<i>HHDP- galloylglucoside Isostrictinin</i>	4,77	0,32
<i>Hippophaenin B</i>	4,80	0,38
<i>Hippophaenin C</i>	4,92	0,15
<i>Hippophaenin C</i>	4,98	0,30
<i>Procyanidin dimmer type B</i>	5,03	0,51
<i>Galloyl- bis- HHDP- glucose III</i>	5,24	1,45
<i>Tellimagrandin I. Monomeric</i>	5,47	0,29
<i>Ellagitannin</i>	5,68	5,82
<i>Ellagitannin</i>	6,08	5,19
<i>Ellagitannin</i>	6,31	7,51
<i>Ellagic acid rutinoside</i>	6,38	0,94
<i>Quercetin- 3- O- rutinoside</i>	6,42	0,75
<i>Ellagitannin</i>	6,59	0,59
<i>Myricetin dimethyl ether rutinoside</i>	6,64	0,14
<i>Kaempferol- hexoside- rhamnose</i>	6,70	0,68
<i>Isorhamnetin- dihexoside</i>	6,90	1,15
<i>Isorhamnetin- 3- O- rutinoside</i>	7,03	0,09
<i>Isorhamnetin- 3- O- galactoside</i>	7,11	0,28
<i>Isorhamnetin- 3- O- glucoside</i>	7,31	0,51
<i>Isorhamnetin- 3- O- Hexoside- 7- Orhamnoside</i>	7,42	0,04
<i>Isorhamnetin- 3- O- rutinoside isomer</i>	7,55	0,02
<i>Kaempferol- 3- O- rutinoside</i>	7,75	0,19
<i>Quercetin- glucoside- rhamnosiderhamnoside</i>	7,88	0,22
<i>Quercetin- hexoside- rhamnosiderhamnoside</i>	9,90	0,02
<i>Isorhamnetin- dihexoside- Hexoside</i>	10,25	0,08
<i>Isorhamnetin- dihexoside- Hexoside</i>	10,74	0,11
<i>Kaempferol- Hexoside- p- Coumaroil</i>	10,88	0,06
ИТОГО		58,26

Проведенные исследования показали, что плоды *Hippophae rhamnoides L.* богаты полифенолами, в основном из группы танинов и их производных: гидролизуемых танинов или эллаготанинов. Танины – это нефлавоноидные соединения, которые являются вторичными метаболитами растений и известны своим горьким вкусом. Хотя известно, что танины оказывают токсическое действие, они все же обладают множеством полезных для здоровья свойств, что обуславливает их большой интерес в исследовательских областях. Танины, особенно галлоильные, обладают антимикробной активностью. Они могут либо связываться с белками на стенке бактериальной клетки, взаимодействовать с бактериальными ферментами или напрямую повреждать внешнюю стенку и бактериальную мембрану. Более того, танины обладают антиоксидантными свойствами. Исследователи обнаружили, что они могут иметь лучшие антиоксидантные свойства, чем мономерные полифенолы [5, 12, 16].

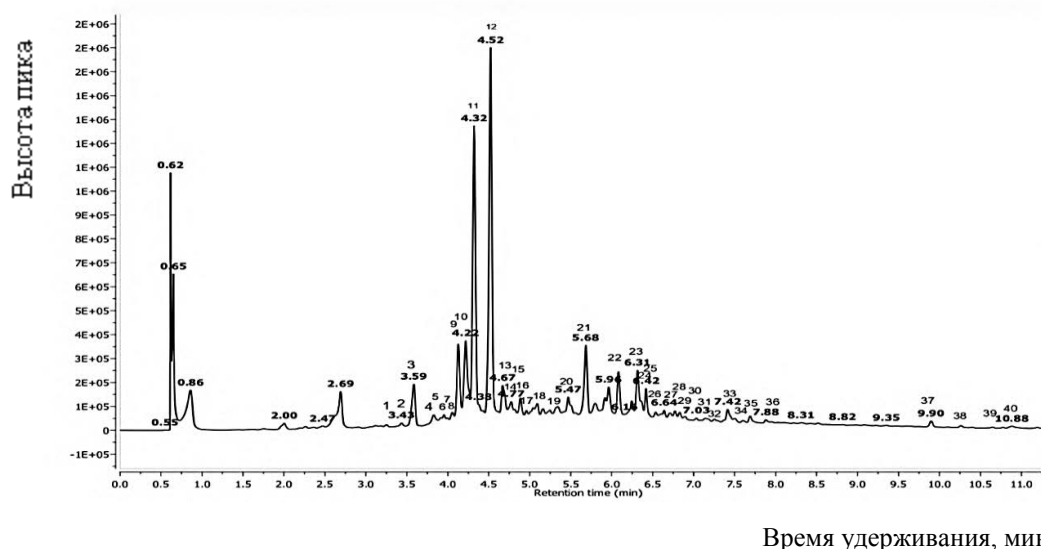


Рисунок 2 – Хроматограмма БАВ, извлеченных из плодов *Hippophae rhamnoides* L.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что плоды *Hippophae rhamnoides* L. являются перспективным ценным ресурсом для использования в качестве функционального ингредиента в рецептурах пищевых систем. Более того, плоды *Hippophae rhamnoides* L. – ценный компонент высококачественного белка с благоприятным составом незаменимых аминокислот.

Библиография

1. Фролова Н.А., Резниченко И.Ю., Шкрабтак Н.В. и др. Анализ вторичных метаболитов дикорастущих плодов *Vitis amurensis*, произрастающих на территории Калининградской области // АПК России. – 2024. – Т. 31, № 1. – С. 119–122.
2. Shkrabtak N., Praskova Ju., Frolova N. Assessment of the state of the environment of the Russian Far East // E3s web of conferences: VIII International Conference on Advanced Agritechologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023), Krasnoyarsk, 29–31 марта 2023 года. – Krasnoyarsk: EDP Sciences, 2023. – Vol. 390. – P. 01030.
3. Ковалёва Н.А., Тринеева О.В., Бузлама А.В. и др. Фармакологическая активность облепихи крушиновидной листьев: *in silico* и *in vivo* // Разработка и регистрация лекарственных средств. – 2023. – Т. 12, № 3. – С. 174–188.
4. Ибрагимов З.Р., Гайтова Т.Р. Листья облепихи как источник БАВ // Актуальные проблемы химии, биологии и биотехнологии: материалы X Всерос. науч. конф. – Владикавказ: Изд-во Северо-Осетинского гос. ун-та им. К.Л. Хетагурова. – 2016. – С. 323–325.
5. Мельников О. М., Верещагин А.Л., Кошелев Ю.А. Исследование биологически активных соединений почек и плодов мужских растений облепихи крушиновидной // Химия растительного сырья. – 2010. – № 2. – С. 113–116.
6. Roth G. A. [et al.]. Global burden of cardiovascular diseases and risk factors, 1990–2019: update from the GBD 2019 study // Journal of the American college of cardiology. 2020. –Vol. 76, N 25. – P. 2982–3021.
7. Кукина Т.П., Ралдугин В.А. Нейтральные и кислые компоненты экстрактов плодов облепихи // Новое в биологии, химии и фармакологии облепихи. – Новосибирск, 1991. – С. 94–98.
8. Котова Т.И., Хантургаев В.А., Цыцыков В.А. и др. Исследование процесса получения густых экстрактов из плодов облепихи // Вестник ВСГУТУ. – 2023. – № 1 (88). – С. 29–35.
9. Ахметханова Е.Н. Облепиха // Матрица научного познания. – 2022. – № 4–1. – С. 189–191.
10. Ахметханова Е.Н. Облепиха в разработке новых пищевых продуктов // Матрица научного познания. – 2022. – № 6–2. – С. 28–30.

11. Алексеев А.Л., Кротова О.Е., Ефимов Д.С. Облепиха – натуральная функциональная добавка в технологии производства мясных изделий // Проблемы развития АПК региона. – 2024. – № 2 (58). – С. 163–169.
12. Ковалева Н.А., Тринева О.В., Носова Д.К. и др. Определение экстрактивных веществ в листьях облепихи крушиновидной // Вестник Воронежского гос. ун-та. Серия: Химия. Биология. Фармация. – 2022. – № 1. – С. 105–109.
13. Nilova L.P., Malyutenkova S.M. Antioxidant complexes of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) of northwest Russia. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2021. – N 83 (1). – P. 108.
14. Żuchowski J. Phytochemistry and pharmacology of sea buckthorn (*Elaeagnus rhamnoides*; syn. *Hippophae rhamnoides*): progress from 2010 to 2021 // Phytochemistry Reviews. – 2023. – Vol. 22, N 1. – P. 3–33.
15. Hagerman A.E. [et al.]. High molecular weight plant polyphenolics (tannins) as biological antioxidants // Journal of agricultural and food chemistry. – 1998. – Vol. 46, N 5. – P. 1887–1892.
16. Черноусова И.В., Мосолкова В.Е., Зайцев Г.П. и др. Полифенолы виноградной грозди, качественный и количественный состав, технологический запас // Химия растительного сырья. – 2022. – № 3. – С. 291–300.

Bibliography

1. Frolova N.A., Reznichenko I.Yu., Shkrabtak N.V. et al. Analysis of secondary metabolites of wild fruit of *Vitis amurensis* growing in the Kaliningrad region // AIC of Russia, 2024. – Vol. 31, N 1. – P. 119–122.
2. Shkrabtak N., Praskova Ju., Frolova N. Assessment of the state of the environment of the Russian Far East // E3s web of conferences : VIII International Conference on Advanced Agritechologies, Environmental Engineering and Sustainable Development (AGRITECH-VIII 2023). – Krasnoyarsk, March 29-31, 2023. – Vol. 390. – Krasnoyarsk: EDP Sciences, 2023. – P. 01030.
3. Kovalyeva N.A., Trineeva O.V., Buzlama A.V. [et al.] Pharmacological activity of sea buckthorn leaves: in silico and in vivo // Drug Development and Registration, 2023. – Vol. 12, N 3. – P. 174–188.
4. Ibragimov Z. R., Gaitova T. R. Sea buckthorn leaves as a source of biologically active substances // Actual problems of chemistry, biology and biotechnology: Proceedings of X All-Russian scientific conference. – Vladikavkaz: Publishing house of North Ossetian State University after K.L. Khetagurov, 2016. – P. 323–325.
5. Melnikov O.M., Vereshchagin A.L., Koshelev Yu.A. Study of biologically active compounds of buds and fruit of male plants of sea buckthorn // Chemistry of plant raw material. – 2010. – N 2. – P. 113–116.
6. Roth G.A. [et al.] Global burden of cardiovascular diseases and risk factors, 1990–2019: update from the GBD 2019 study // Journal of the American College of Cardiology. – 2020. – Vol. 76, N 25. – P. 2982–3021.
7. Kukina T.P., Raldugin V.A. Neutral and acidic components of sea buckthorn fruit extracts // New in the biology, chemistry and pharmacology of sea buckthorn. – Novosibirsk, 1991. – P. 94–98.
8. Kotova T.I., Khanturgaev V.A., Tsytsykov V.A. [et al.] Study of the process of obtaining dense extracts from sea-buckthorn leaves // ESSUTM Bulletin. – 2023. – N 1 (88). – P. 29–35.
9. Akhmetkhanova E.N. Sea buckthorn // Matrix of Scientific Cognition. – 2022. – N 4–1. – P. 189–191.
10. Akhmetkhanova E.N. Sea buckthorn in the development of new food products // Matrix of Scientific Cognition. – 2022. – N 6–2. – P. 28–30.
11. Alekseev A.L., Krotova O.E., Efimov D.S. Sea buckthorn – a natural functional additive in the technology of meat production // Problems of development of the regional agro-industrial complex. – 2024. – N 2 (58). – P. 163–169.
12. Kovaleva N.A., Trineeva O.V., Nosova D.K. et al. Determination of extractive substances in sea buckthorn leaves // Bulletin of the Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy. – 2022. – N 1. – P. 105–109.
13. Nilova L.P., Malyutenkova S.M. Antioxidant complexes of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) of northwest Russia // Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. – 2021. – N 83 (1). – P. 108.
14. Żuchowski J. Phytochemistry and pharmacology of sea buckthorn (*Elaeagnus rhamnoides*; syn. *Hippophae rhamnoides*): progress from 2010 to 2021 // Phytochemistry Reviews. – 2023. – Vol. 22, N 1. – P. 3–33.
15. Hagerman A.E. [et al.] High molecular weight plant polyphenolics (tannins) as biological antioxidants // Journal of agricultural and food chemistry. – 1998. – Vol. 46, N 5. – P. 1887–1892.
16. Chernousova I.V., Mosolkova V.E., Zaitsev G.P. [et al.] Polyphenols of grapes, qualitative and quantitative composition, technological reserve // Chemistry of plant raw material. – 2022. – N 3. – P. 291–300.

DOI 10.53980/24131997_2024_4_43

С.Л. Тихонов^{1,2}, д-р техн. наук, проф., e-mail: tihonov75@bk.ru
Н.В. Тихонова¹, д-р техн. наук, проф., e-mail: tihonov75@bk.ru
М.С. Тимофеева³, студент, e-mail: maria_tih13.02@icloud.com
С.В. Шихалев¹, канд. техн. наук., доц.

¹ Уральский государственный аграрный университет

² Уральский государственный лесотехнический университет

³ Уральский государственный медицинский университет
г. Екатеринбург

УДК 543.645.6

НОВЫЙ ПИЩЕВОЙ ПЕПТИД ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ФОТОСТАРЕНИЯ КЛЕТОК: ХАРАКТЕРИСТКА И ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ *IN VITRO*

Проведено конструирование пептида на платформе Enalos InSilicoNano, использующей базу данных PubChem в рамках виртуального создания пептидов и скрининга. Получен пептид с молекулярной формулой $C_{83}H_{150}N_{24}O_{24}S_4$ и последовательностью аминокислот: CTKSICTKKTLRTPPIC. Показано его использование в качестве вещества с необходимыми физико-химическими свойствами для эффективного применения в составе пищевых продуктов и в качестве действующего начала в соответствующих биологически активных добавках. Общее гидрофобное соотношение, определенное APD равно 39 %, гидрофобность пептида по Уимли – Уайту в целом остатке – 3,23. Потенциал связывания с белками (индекс Бомана) составляет 1,4 ккал / моль. Внешний коэффициент экстинкции равен $250 M^{-1} cm^{-1}$ при длине волны 280 нм, измеренной в воде. Предполагаемый период полувыведения *in vivo* составляет более 10 ч. Индекс нестабильности исследуемого пептида составляет 37,77. Индекс гидропатичности исследуемого пептида – 0,011. Показано, что обработка клеток фибробластов легкого человека (Fibr) ультрафиолетовым излучением достоверно ($p \leq 0,01$) снизила жизнеспособность клеток на 47 %, культивирование клеток с пептидом значительно уменьшило отрицательное воздействие ультрафиолетового излучения. Так, жизнеспособность фибробластов при калькировании с пептидом и облученных ультрафиолетовыми лучами составила 92 %. Соответственно, использование пептида снижает эффект фотостарения клеток в 1,9 раза. Установлено, что исследуемый пептид уникален, не токсичен и не антигенен. В эксперименте *in vitro* показано, что полученный пептид предупреждает фотостарение клеток.

Ключевые слова: пептиды, фотостарение, синтез, конструирование, антигенность.

S.L. Tikhonov^{1,2}, Dr. Sc. Engineering, Prof.

N.V. Tikhonova¹, Dr. Sc. Engineering, Prof.

M.S. Timofeeva³, student

S.V. Shikhalev¹, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

¹ Ural State Agrarian University

² Ural State Forest Engineering University

³ Ural State Medical University
Yekaterinburg

NEW FOOD PEPTIDE CELL PHOTOAGING FOR PREVENTING: PERFORMANS AND *IN VITRO* CONFIRMATION OF EFFECTIVENESS

The peptide was designed on the Enalos InSilicoNano platform using the PubChem database as part of virtual peptide creation and screening. A peptide with the molecular formula $C_{83}H_{150}N_{24}O_{24}S_4$ and the sequence of amino acids was obtained: CTKSICTKKTLRTPPIC. Its use as a substance with the necessary

physico-chemical properties for effective use in food products and as an active ingredient in appropriate biologically active additives is shown. The total hydrophobic ratio determined by APD is 39%, the hydrophobicity of the peptide according to Wimley-White in the whole residue is 3,23. The binding potential with proteins (Boman index) is: 1,4 kcal / mol. The external extinction coefficient is $250 M^{-1} \text{ cm}^{-1}$ at wavelength of 280 nm measured in water. Estimated in vivo half-life is more than 10 hours. Instability index of the studied peptide is 37,77. Index of hydropathy of the studied peptide is -0,011. It was shown that the treatment of human lung fibroblast cells (Fibr) with ultraviolet radiation significantly ($p \leq 0,01$) reduced the viability of cells by 47 %, the cultivation of cells with the peptide significantly reduced negative effects of ultraviolet radiation. Thus, the viability of fibroblasts when calcined with the peptide and irradiated with ultraviolet rays was 92 %. Accordingly, use of the peptide reduces the effect of photoaging cells by 1,9 times. It has been established that the studied peptide is unique, non-toxic and non-antigenic. In an in vitro experiment, it was shown that the resulting peptide prevents photoaging of cells.

Key words: *peptides, photoaging, synthesis, design, antigenicity.*

Введение

Длительное действие ультрафиолетового облучения (УФО) на кожу может вызывать эффект фотостарения, покраснения и на уровнях клетки способствует образованию активных форм кислорода (АФК) [1]. При этом вся теория старения клеток основывается на теории образования свободных радикалов за счет накопления АФК в митохондриях клеток, следовательно, клетка является мишенью негативного действия УФО в целом на организм [2, 3]. Накопление АФК приводит к повреждению ферментативного и неферментативного звеньев антиоксидантной защиты (АОЗ) кожи, окислительному повреждению геномной и митохондриальной ДНК [4]. Рассматривая теорию старения митохондрий клеток, следует отметить связь между синтезом АТФ и переносом свободных электронов. Так, функционирование митохондриальной цепи переноса электронов регулирует выработку АТФ в клетках и активизирует ряд ферментных комплексов с условными номерами 1–5. Так, кофермент Q10 регулирует активность комплексов 2 и 5 и перенос электронов в митохондриях в целом.

На фотостарение и выживаемость клеток под действием УФО оказывает влияние белок SIRT-1, а ослабление его активности – один из критериев оценки начала старения [5].

SIRT-1 относится к семейству сиртунинов, катализирующих деацетилирование различных субстратов путем использования никотинамида [6], усиливает пролиферацию pGC-1 α и p53 в некоторых сигнальных путях, включая PI3K-Akt, Rap1/Ras и путь, регулирующий продолжительность жизни клеток [7]. SIRT1 способен регулировать гомеостаз клетки, повышать выживаемость нейронов и митохондриальный биогенез [8, 9].

УФО вызывает экспрессию гена циклооксигеназы-2 (ЦОГ-2), регулирующего воспалительные процессы в коже и снижающего активность SIRT-1 [10]. В исследованиях [11] установлено, что белок SIRT-1 защищает клетки от окислительного стресса и препятствует образованию АФК в нейронах, клетках эндотелия и миокарда крыс сердечной мышцы, нейронах и активируется для защиты клеток от окислительного стресса. Повышение активности SIRT-1 и PGC-1 α ограничивает выработку АТФ, что снижает окислительный стресс. В исследованиях [12] установлено, что активация PGC-1 α ограничивает синтез энергии в митохондриях и ослабляет окислительный стресс и, соответственно, предупреждает фотостарение.

Вышеуказанные белки и пептиды также использовались для лечения пигментации, улучшения синтеза внеклеточного матрикса, модуляции врожденного иммунитета и воспаления. Использование пептидов имеет ряд преимуществ, таких как их селективность, отсутствие нормативных требований к их применению на рынке и отсутствие у них иммуногенности. Напротив, низкая липофильность и высокая молекулярная масса пептидов могут негативно влиять на их всасывание в коже. Результаты исследования эффективности пептидов для дерматологического применения показаны в работе [13].

Пептиды обладают способностью модулировать несколько иммунных механизмов, связанных с воспалением и заживлением ран в организме хозяина. Исследования применимо-

сти пептидов на коже, а также их безопасность при местном применении представлены в работе [14]. Биологически активные пептиды можно получить путем гидролиза соевого белка пепсином и трипсином [15] и яичного белка [16].

Фракция пептида (CDP), полученная из хлореллы, продемонстрировала способность снижать экспрессию генов нескольких белков в фибробластах, облученных ультрафиолетовым излучением, таких как MMP-1 и богатый цистеином 61 (CYR61), а также белка-хемоаттрактанта моноцитов-1 (MCP-1). Активация MMPs связана с фотостарением, ускоряющим разрушение коллагена кожи и ингибирующим синтез коллагена ECM. Ингибирование экспрессии MMP или активация синтеза коллагена могут быть стратегией предотвращения образования морщин, связанных с фотостарением [17]. Аналогичным образом обогащенные пептидами экстракты из микроводоросли *Arthrospira platensis* эффективно способствуют увлажнению кожи, повышая экспрессию генов нескольких факторов, специфически участвующих в поддержании водного баланса в кератиноцитах (аквапорин 3, синтаза 3 гиалуроновой кислоты и филагрина). Кроме того, авторами работы [18] было обнаружено, что ингибирование выработки АФК было вызвано агентами окислительного стресса.

Необходимо учитывать некоторые ограничения природных пептидов, такие как взаимодействие с другими неспецифическими биологическими компонентами и риск потенциальных аллергенов. С другой стороны, выделение и определение характеристик одной пептидной фракции может быть очень сложной задачей из-за высоких затрат. Поэтому работа с синтетическими пептидами иногда становится более привлекательной.

Поэтому **целью работы** является конструирование, синтез, характеристика пептида и оценка его влияния на процесс фотостарения в эксперименте *in vitro*.

Материал и методы исследования

В качестве объекта исследований использован сконструированный пептид со следующей последовательностью аминокислот *CTKSICTKKTLRTCPPIC*. Синтез пептида осуществляли в компании Permics Co., Ltd (Сучжоу, Китай) методом трехфазного синтеза. Прогностическую модель пептида строили по программе определения токсичности (https://tripod.nih.gov/web_adme/cytotox.html), что представляет собой надежный способ определения приоритетности молекул с небольшой цитотоксичностью или без нее для последующей разработки.

Антигенность (аллергенность) пептида оценивали по программе <http://imed.med.ucm.es/Tools/antigenic.pl>. Эта программа прогнозирует те сегменты последовательности белка, которые, вероятно, будут антигенными, вызывая реакцию антител. Заявленная точность метода составляет около 75 %.

Идентификацию пептида проводили на платформе PeptideAtlas, которая характеризуется как общедоступный сборник пептидов, идентифицированных в ходе большого набора тандемных экспериментов по протеомике с масс-спектрометрией. Выходные файлы масс-спектрометра собираются для человека, мыши, дрожжей и ряда других организмов и выполняются с использованием новейших поисковых систем и последовательностей белков. Все результаты поиска последовательностей и спектральной библиотеки впоследствии обрабатываются для единообразного определения вероятности правильной идентификации для всех результатов и для обеспечения высокого качества базы данных наряду с частотой ложных обнаружений и на уровне всего atlas (<https://db.systemsbiology.net/sbeams/cgi/PeptideAtlas/Search>); на платформе UniProt, которая является ведущим в мире высококачественным, всеобъемлющим и свободным доступным ресурсом по последовательности белков и функциональной информации (<https://www.uniprot.org/tool-dashboard>) [19] в национальном центре биотехнологической информации NCBI (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>).

Физические и химические характеристики пептида оценивали с помощью платформы ProtParam (<https://web.expasy.org/protparam/>). Вычисленные параметры включали молекуляр-

ную массу, теоретический pI, аминокислотный состав, атомный состав, коэффициент экстинкции, расчетный период полураспада, индекс нестабильности, алифатический индекс и общее среднее значение гидропатичности.

Прогнозирование характеристик пептида также осуществляли по базе данных пептидов APD (<https://aps.unmc.edu/home>). Конструирование пептида проводили с использованием платформы Enalos InSilicoNano – онлайн-инструмент поддержки принятия решений для проектирования и виртуального скрининга наночастиц *in silico* (http://enalos.insilicotox.com/QNAR_PaCa2/).

Для определения фотостарения использовали фибробласты легкого человека (Fibr), которые культивировали в среде DMEM при температуре 37 °С в атмосфере с 5 % содержанием CO₂ в CO₂-инкубаторе Galaxy CO170R. Фотостарение клеток оценивали по их жизнеспособности. Определение жизнеспособности клеток приводили с помощью МТТ-теста.

Для эксперимента Fibr рассаживали в 96-луночные планшеты в количестве 0,5×10⁶ клеток на лунку в 100 мкл среды, инкубировали в течение 24 ч, затем подвергали воздействию ультрафиолетового излучения с мощностью светового потока 35 Дж/см² в течение 45 мин. Затем клетки инкубировали в течение 24 ч, добавляли 10 мкл раствора 3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide (МТТ) с конечной концентрацией 0,5 мг/мл и инкубировали в CO₂-инкубаторе Galaxy CO170R (New Brunswick, Канада) в течение 4 ч (контроль).

Клетки рассаживали в 96-луночные планшеты в количестве 0,5×10⁶ клеток на лунку в 100 мкл среды, добавляли 50 мкг/мл исследуемого пептида и инкубировали в течение 24 ч, затем подвергали воздействию ультрафиолетового излучения с мощностью светового потока 35 Дж/см² в течение 45 мин. Затем клетки инкубировали в течение 24 ч, добавляли МТТ и инкубировали в течение 4 ч (опыт). Интенсивность окраски измеряли с помощью микропланшетного спектрофотометра по методике [20].

Результаты исследований и их обсуждение

Было проведено конструирование пептида на платформе Enalos InSilicoNano, использующей базу данных PubChem в рамках виртуального синтеза пептидов и скрининга. Был получен пептид с молекулярной формулой C₈₃H₁₅₀N₂₄O₂₄S₄ со следующей аминокислотной последовательностью: *CTKSICTKKTLLRTPPIC*.

С помощью платформы ProtParam были получены его физико-химические характеристики. Количество аминокислотных остатков в пептиде – 18. Атомный состав пептида был следующим: углерод (С) – 83, водород (Н) – 150, азот (N) – 24, кислород (O) – 24 и сера (S) – 4. Формула: C₈₃H₁₅₀N₂₄O₂₄S₄. Общее количество атомов: 285. Общее количество положительно заряженных остатков равнялось 4, молекулярная масса составила 1996,49 Да, теоретическая изоэлектрическая точка (pI) была на уровне 9,25. Общее гидрофобное соотношение, определенное APD было равно 39 %, гидрофобность пептида по Уимли – Уайту в целом остатке – 3,23. Потенциал связывания с белками (индекс Бомана) составил: 1,4 ккал / моль. Поскольку последовательность содержала четное количество Cys, она могла образовывать (1) связанную дисульфидными связями дефензиноподобную бета-структуру (~ 16–60 остатков AA.); (2) спиральные структуры, содержащие S-S связь; или (3) множественные тиоэфирные связи, как в антибиотиках, так как содержание Thr / Ser было высокое.

Внешний коэффициент экстинкции был равен 250 М⁻¹ см⁻¹ при длине волны 280 нм в водном растворителе. Абсолютный был на уровне 0,125 М⁻¹ см⁻¹, при условии, что все пары остатков Cys образовывали цистины.

Предполагаемый период полувыведения *in vivo* составлял более 10 ч. Период полураспада – это прогноз времени, необходимого для исчезновения половины количества белка в клетке после его синтеза. ProtParam полагается на «правило N-конца», которое связывает период полураспада белка с идентичностью его N-концевого остатка; прогноз был дан для 3 модельных организмов (человека, дрожжей и кишечной палочки). Правило N-конца основано на

наблюдениях о том, что идентичность N-концевого остатка белка играет важную роль в определении его стабильности *in vivo*. Правило было установлено в результате экспериментов, в ходе которых изучалась метаболическая судьба искусственных белков бета-галактозидазы с различными N-концевыми аминокислотами, сконструированных методом сайт-направленного мутагенеза. Сконструированные таким образом белки beta-gal имели разительно отличающийся период полураспада *in vivo* (от более чем 100 ч до менее чем 2 мин) в зависимости от природы аминокислоты на аминоконце и от экспериментальной модели.

Индекс нестабильности позволяет оценить стабильность пептида в пробирке. Пептид, индекс нестабильности которого меньше 40, считается стабильным, значение выше 40 указывает на то, что белок может быть нестабильным. Индекс нестабильности исследуемого пептида составлял 37,77, что позволяет его классифицировать как стабильный.

Алифатический индекс белка определяется как относительный объем, занимаемый алифатическими боковыми цепями (аланином, валином, изолейцином и лейцином). Его можно рассматривать как положительный фактор, повышающий термостабильность пептида. Алифатический индекс исследуемого пептида составлял 65,00, что свидетельствует о его термостабильности, что позволяет вводить в качестве функционального ингредиента в пищевые продукты, подвергающиеся термической обработке в процессе производства.

Индекс гидропатичности – это число, отражающее гидрофобные или гидрофильные свойства боковой цепи аминокислоты. Среднее значение гидропатичности у исследуемого пептида составляло 0,011, что является оптимальным для обеспечения биодоступности пептида.

На основании полученных характеристик пептида можно предположить, что его можно использовать в качестве действующего начала в биологически активных добавках и пищевых продуктах с заданными свойствами.

При создании нового биологически активного вещества (БАВ) необходимо учитывать его антигенность/аллергенность.

Для прогнозирования антигенных детерминант известно несколько методов, основанных на различных физико-химических свойствах экспериментально определенных эпитопов (гидрофильность, биодоступность), из которых антигенный индекс и Preditop являются важными показателями. Самым простым и доступным методом прогнозирования антигенных детерминант является метод, основанный на наличии аминокислотных остатков в экспериментально определенных эпитопах. Прогнозирование антигенных детерминант с помощью этого метода проводили на сайте <http://imed.med.ucm.es/Tools/antigenic.html#Directions>. Результаты исследований представлены на рисунке 1.

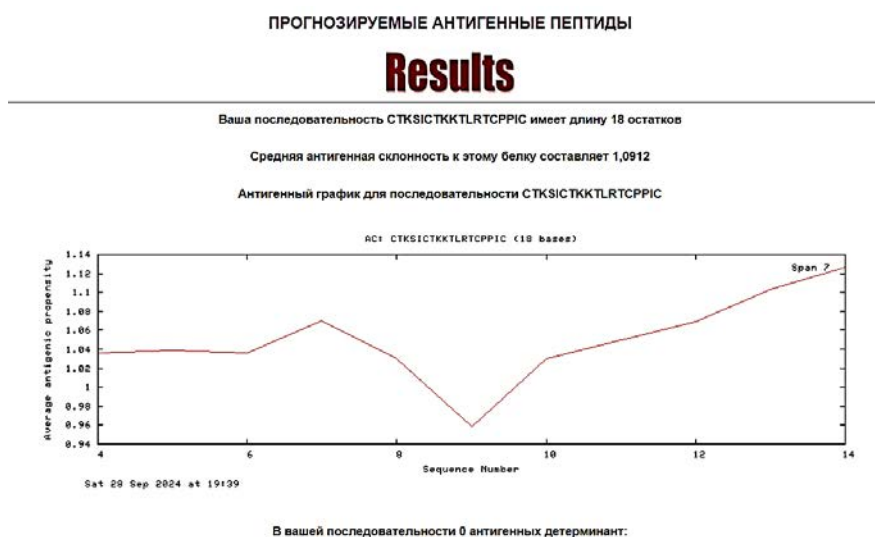


Рисунок 1 – Прогнозирование антигенных детерминант пептида CTKSICTKKTLRTPPIC

Полученный пептид не являлся антигенным, так как среднее значение было равно 1,0912 (более 1,3 – пептид потенциально является антигенным). В исследуемом пептиде не было антигенных детерминант, что позволило использовать его в составе пищевой продукции, не предупреждая потребителя о возможных аллергенных реакциях при его употреблении.

Проведено исследование по определению токсичности пептида (рис. 2).

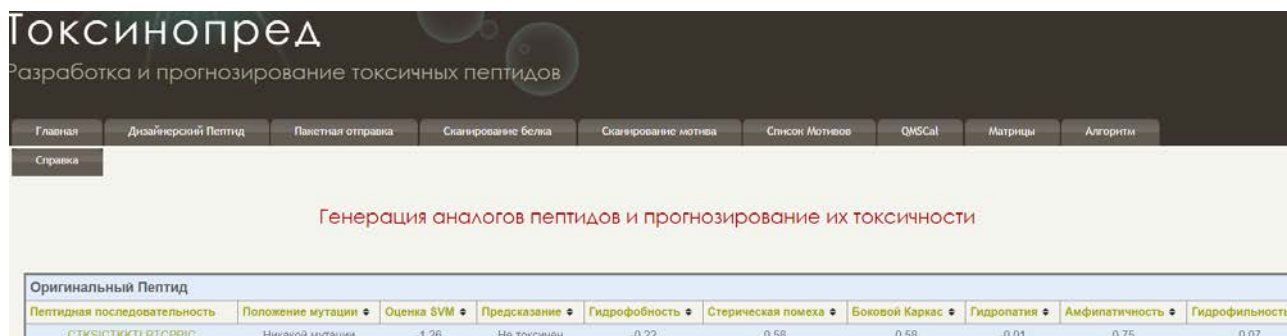


Рисунок 2 – Прогнозирование токсичности пептида *CTKSICTKKTLRTPPIC*

На основании аминокислотной последовательности, гидрофобности, гидропатии, гидрофильности и других характеристик пептида *CTKSICTKKTLRTPPIC* по программе Токсинопред было установлено, что исследуемый пептид не являлся токсичным.

Идентификация пептида была проведена на платформах PeptideAtlas, UniProt и в базе национального центра биотехнологической информации NCBI. Результаты представлены на рисунках 3–5.

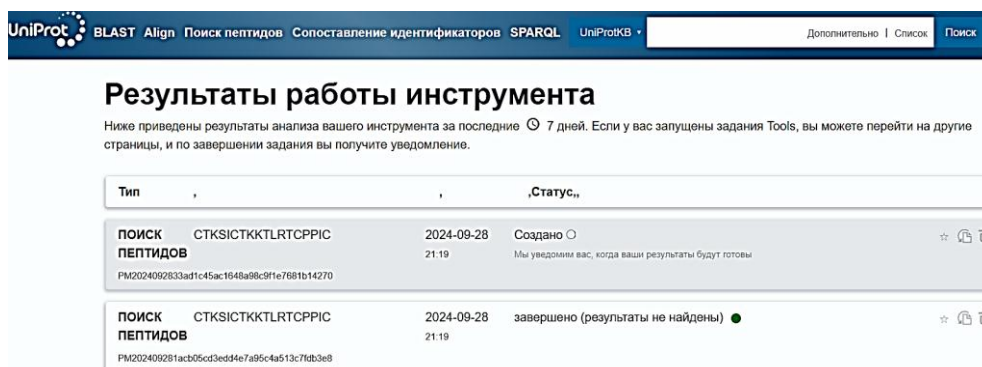


Рисунок 3 – Результаты идентификации пептида *CTKSICTKKTLRTPPIC* на платформе UniProt

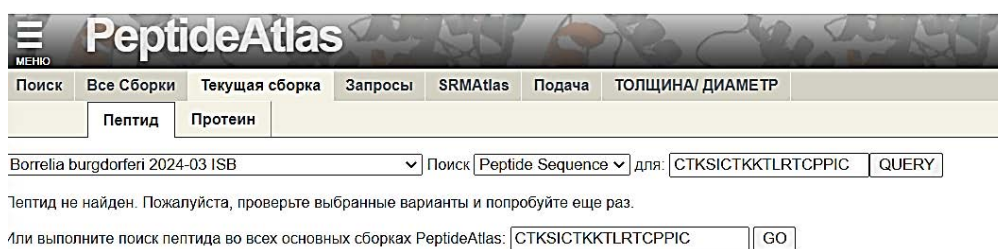


Рисунок 4 – Результаты идентификации пептида *CTKSICTKKTLRTPPIC* на платформе PeptideAtlas



Рисунок 5 – Результаты идентификации пептида *СТКСІСТККТЛRТСРРІС* на платформе в базе национального центра биотехнологической информации NCBI

Из данных, представленных на рисунках 3–5, видно, что пептид *СТКСІСТККТЛRТСРРІС* являлся уникальным.

В результате проведенных исследований по влиянию пептида на фотостарение клеток, обработанных ультрафиолетовым излучением, было показано, что обработка клеток фибробластов легкого человека (Fibr) ультрафиолетовым излучением достоверно ($p \leq 0,01$) снизила жизнеспособность 47 % клеток, культивирование клеток с пептидом значительно уменьшило отрицательное воздействие ультрафиолетового излучения. Так, жизнеспособность фибробластов при культивировании с пептидом и облученных ультрафиолетовыми лучами составила 92 %. Соответственно, использование пептида снижает эффект фотостарения клеток в 1,9 раза.

Заключение

Сконструирован новый пептид, дана характеристика его физико-химических свойств. Установлено, что пептид уникален, не токсичен и не антигенен. В эксперименте *in vitro* показано, что полученный пептид предупреждает фотостарение клеток.

Библиография

1. Lephart E.D. Skin aging and oxidative stress: equol's anti-aging effects via biochemical and molecular mechanisms, *Ageing Res. Rev.* 31. – 2016. – P. 36–54.
2. Ichihashi M., Ueda M., Budiyanto A. et al. UV-induced skin damage, *Toxicology* 189 (1–2). – 2003. – P. 21–39.
3. Cannon B., Shabalina I.G., Kramarova T.V. et al. Uncoupling proteins: a role in protection against reactive oxygen species – or not? *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics* 1757 (5–6). – 2006. – P. 449–458.
4. Svobodová A., Psotová J., Walterová D. Natural phenolics in the prevention of UV-induced skin damage. A review, *Biomed. Pap. Med. Fac. Univ. Palacky Olomouc Czech.* 147 (2). – 2003. – P. 137–145.
5. Ming M., Zhao B., Shea C.R. et al. Loss of sirtuin 1 (SIRT1) disrupts skin barrier integrity and sensitizes mice to epicutaneous allergen challenge // *J. Allergy Clin. Immunol.* – 2015. – N 135 (4). – P. 936–945 e4.
6. Kumar R., Nigam L., Singh A.P. et al. Design, synthesis of allosteric peptide activator for human SIRT1 and its biological evaluation in cellular model of Alzheimer's disease, *Eur // J. Med. Chem.* – 2017. – N 127. – P. 909–916.
7. Nacarelli T., Azar A., Sell C. Inhibition of mTOR prevents ROS production initiated by ethidium bromide-induced mitochondrial DNA depletion, *Front. Endocrinol. (Lausanne)* 5. – 2014. – P. 122.
8. Guarente L. Calorie restriction and sirtuins revisited, *Genes Dev.* 27 (19). – 2013. – P. 2072–2085.
9. Satoh A., Imai S.-i. Hypothalamic Sirt1 in aging, *Aging (Albany NY).* – 2014. – N 6 (1).
10. Michan S., Sinclair D. Sirtuins in mammals: insights into their biological function // *Biochem. J.* – 2007. – N 404 (1). – P. 1–13.

11. Khan R.S., Dine K., Sarma J.D. et al. SIRT1 activating compounds reduce oxidative stress mediated neuronal loss in viral induced CNS demyelinating disease, *Acta Neuropathol. Commun.* 2 (1). – P. 2014.
12. Lopez-Lluch G., Hunt N., Jones B. et al. Calorie restriction induces mitochondrial biogenesis and bioenergetic efficiency // *Proc. Natl. Acad. Sci.* – 2006. – N 103 (6). – P. 1768–1773.
13. Pai V.V., Bhandari P., Shukla P. Topical peptides as cosmeceuticals Indian // *J. Dermatol. Leprol.* – 2017. – N 83. – P. 9–18.
14. Moyer T.B., Brechbill A.M., Hicks L.M. Mass spectrometric identification of antimicrobial peptides from medicinal seeds // *Molecules.* – Vol. 26.
15. Жамсаранова С.Д., Лебедева С.Н., Болхонов Б.А. и др. Ферментативная конверсия пищевого белка и оценка антиоксидантной активности пептидов // *Вестник ВСГУТУ.* – 2021. – № 4 (83). – С. 5–14.
16. Болхонов Б.А., Соколов Д.В., Жамсаранова С.Д. и др. Выбор рабочих параметров получения пептидов яичного белка // *Вестник ВСГУТУ.* – 2022. – № 4 (87). – С. 15–23.
17. Chen Chiu-Lan, Liou Shu-Fen, Chen Su-Jong et al. Protective effects of Chlorella-derived peptide on UVB-induced production of MMP-1 and degradation of procollagen genes in human skin fibroblasts, *Regulatory Toxicology and Pharmacology.* – 2011. – Vol. 60, Issue 1. – P. 112–119. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2011.03.001>.
18. Chien Karen B. Three-Dimensional Printing of Soy Protein Scaffolds for Tissue Regeneration Publication // *Tissue Engineering Part C: Methods.* – 2012. – Vol. 19, N 6. – P. 417–426.
19. The UniProt Consortium, UniProt: the Universal Protein Knowledgebase in 2023, *Nucleic Acids Research.* – 2023. – Vol. 51, Issue D1P. – D523–D531. – URL: <https://doi.org/10.1093/nar/gkac1052>
20. Wu P.-Y., Huang C.-C., Chu Y. et al. Alleviation of ultraviolet B-induced photodamage by Coffea arabica extract in human skin fibroblasts and hairless mouse skin // *Int. J. Mol. Sci.* – 2017. – N 18 (4). – P. 782.

Bibliography

1. Lephart E.D. Skin aging and oxidative stress: equol's anti-aging effects via biochemical and molecular mechanisms // *Ageing Research Reviews.* – 2016. – Vol. 31. – P. 36–54.
2. Ichihashi M., Ueda M., Budiyanto A. et al. UV-induced skin damage // *Toxicology.* – 2003. – Vol. 189. – P. 21–39.
3. Cannon B., Shabalina I.G., Kramarova T.V. et al. Uncoupling proteins: a role in protection against reactive oxygen species – or not? // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics* – 2006. – Vol. 1757, Iss. 5–6. – P. 449–458.
4. Svobodová A., Psotová J., Walterová D. Natural phenolics in the prevention of UV-induced skin damage. A review // *Biomedical papers of the Medical Faculty of the University Palacky, Olomouc, Czechoslovakia.* – 2003. – Vol. 147, N 2. – P. 137–145.
5. Ming M., Zhao B., Shea C.R. et al. Loss of sirtuin 1 (SIRT1) disrupts skin barrier integrity and sensitizes mice to epicutaneous allergen challenge // *Journal of Allergy and Clinical Immunology.* – 2015. – Vol. 135, N 4. – P. 936–945 e4.
6. Kumar R., Nigam L., Singh A.P. et al. Design, synthesis of allosteric peptide activator for human SIRT1 and its biological evaluation in cellular model of Alzheimer's disease // *European Journal of Medical Chemistry.* – 2017. – Vol. 127. – P. 909–916.
7. Nacarelli T., Azar A., Sell C. Inhibition of mTOR prevents ROS production initiated by ethidium bromide-induced mitochondrial DNA depletion // *Frontiers in Endocrinology (Lausanne).* – 2014. – Vol. 5. – P. 122.
8. Guarente L. Calorie restriction and sirtuins revisited // *Genes and Development.* – 2013. – Vol. 27, N 19. – P. 2072–2085.
9. Satoh A., Imai S.-i., Hypothalamic Sirt1 in aging // *Ageing (Albany NY).* – 2014. – Vol. 6, N 1.
10. Michan S., Sinclair D. Sirtuins in mammals: insights into their biological function // *Biochemistry Journal.* – 2007. – Vol. 404, Iss. 1. – P. 1–13.
11. Khan R.S., Dine K., Sarma J.D. et al. SIRT1 activating compounds reduce oxidative stress mediated neuronal loss in viral induced CNS demyelinating disease // *Acta Neuropathologica Communications.* – 2014. – Vol. 2, N 1. – P. 1–14.
12. Lopez-Lluch G., Hunt N., Jones B. et al. Calorie restriction induces mitochondrial biogenesis and bioenergetic efficiency // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* – 2006. – Vol. 103, Iss. 6. – P. 1768–1773.

13. *Pai V.V., Bhandari P., Shukla P.* Topical peptides as cosmeceuticals // *Indian Journal of Dermatology, Venereology and Leprology*. – 2017. – Vol. 83. – P. 9–18.
14. *Moyer T.B., Brechbill A.M., Hicks L.M.* Mass spectrometric identification of antimicrobial peptides from medicinal seeds // *Molecules*. – Vol. 26.
15. *Zhamsaranova S.D., Lebedeva S.N., Bolkhonov B.A. [et al.]* Enzymatic food protein conversion and assessment of antioxidant activity of peptides // *ESSUTM Bulletin*. – 2021. – N 4 (83). – P. 5–14.
16. *Bolkhonov B.A., Sokolov D.V., Zhamsaranova S.D. [et al.]* Selection of operating parameters for producing egg protein peptides // *ESSUTM bulletin*. – 2022. – N 4 (87). – P. 15–23.
17. *Chun Chiu-Lin, Lau Shu-Feng, Chen Su-Jong et al.* Protective effects of Chlorella-derived peptide on UVB-induced production of MMP-1 and degradation of procollagen genes in human skin fibroblasts // *Regulatory Toxicology and Pharmacology*. – 2011.– Vol. 60, Iss. 1. – P. 112–119. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2011.03.001>
18. *Chien Karen B., Makridakis E., Shah R.N.* Three-dimensional printing of soy protein scaffolds for tissue regeneration // *Tissue Engineering – Part C: Methods*. – 2012. – Vol. 19, N 6. – P. 417– 426.
19. The UniProt Consortium, UniProt: the Universal Protein Knowledgebase in 2023, *Nucleic Acids Research*. – 2023. – Vol. 51, Iss. D1. – P. D523–D531. – URL: <https://doi.org/10.1093/nar/gkac1052>
20. *Wu P.-Y., Huang C.-C., Chu Y. et al.* Alleviation of ultraviolet B-induced photodamage by Coffea arabica extract in human skin fibroblasts and hairless mouse skin // *International Journal of Molecular Science*. – 2017. – Vol. 18, Iss. 4. – P. 782.

**4.3.1 – ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)**

DOI 10.53980/24131997_2024_4_52

С.Н. Шуханов, д-р техн. наук, проф., e-mail: Shuhanov56@mail.ru
А. В. Кузьмин, д-р техн. наук, проф., e-mail: kuzmin_burgsha@mail.ru
С.В. Агафонов, канд. техн. наук, доц., e-mail: agafonov38@rambler.ru
А.Р. Сухаева, канд. техн. наук, доц., e-mail: suhaewa@yandex.ru
А.В. Косарева, канд. техн. наук, доц., e-mail: ancosar@mail.ru

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского»,
г. Иркутск

УДК 631. 33. 021: 635.21

**ОБЗОР И АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА
ПИТАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ДЛЯ РАЗБРАСЫВАНИЯ ТВЕРДЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ**

Поддержка со стороны аграрной науки способствует функционированию сельскохозяйственного производства на конкурентноспособном уровне. Ключевое значение при этом имеют разработки технического сопровождения агропромышленного комплекса. При этом большую роль играют технические средства и технологии производства сельскохозяйственных культур, в том числе и для выведения новых высокоурожайных сортов, включая горшечные культуры. Эффективность селекционеров во многом зависит от объема и интенсивности их работы. Наилучшим образом получению новых сортов содействуют формируемые селекционно-семеноводческие тепличные комплексы. Неудовлетворительный уровень механизации производственных процессов является существенным сдерживающим фактором. Особо остро стоит задача подготовки грунта и засыпки им горшков. Задача по созданию установки для дозирования сыпучего материала на уровне патентоспособности решена и нашла свое отражение в публикации. Для обоснования ее конструктивных параметров, а также оптимальных режимов функционирования необходимо выполнить обзор и анализ исследований рабочего процесса питателей машин для разбрасывания твердых органических удобрений как ключевого элемента предложенного технического средства. Это позволит осуществить правильный выбор типа питателя. Несмотря на некоторые положительные результаты работ, посвященных исследованию подающих и дозирующих рабочих органов машин для разбрасывания твердых органических удобрений, задача равномерного перемещения по бункеру с последующим дозированием сыпучей массы в целом не решена. Поэтому обзор и анализ технических средств питателей разбрасывателей твердых органических удобрений, а также результаты поисковых опытов по изучению функционирования бункера-дозатора для дозирования торфа создают основу для выбора ленточного питателя как наиболее перспективного в плане дозирования и стабильности подачи.

Ключевые слова: аграрная наука, сельскохозяйственное производство, питатели, разбрасыватели, органические удобрения.

S.N. Shukhanov, Dr. Sc. Engineering, Prof.

A.V. Kuzmin, Dr. Sc. Engineering, Prof.

S.V. Agafonov, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

A.R. Sukhaeva, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

A.V. Kosareva, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

Irkutsk state agrarian university, Irkutsk

**WORKING PROCESS OF TECHNICAL FEEDERS
FOR SOLID ORGANIC FERTILIZERS SPREADING**

Agricultural science contributes to the functioning of agricultural production at competitive level. Key importance is given to technical support for agro-industrial complex. At the same time, technical means and technologies for agricultural production are important, as well as for new high-yielding crop varieties, including potted crops. Effectiveness of plant breeding work largely depends on its volume and intensity. The

best way to obtain new crop varieties is to promote formation of plant breeding and seed-growing greenhouse complexes. The unsatisfactory level of mechanization of production processes is a significant limiting factor. The task of preparing soil and filling pots with it is especially acute. The problem of creating an installation for dispensing bulk material has been solved at the level of patentability and is reflected in the publication. To justify its design parameters, as well as optimal operating modes, it is necessary to review and analyze process studies of machine feeders for spreading solid organic fertilizers. It allows to make correct choice of feeder type. Despite some positive results of scientific researches of feeders and spreaders of solid organic fertilizers, the problem of steady movement through bunker with subsequent bulk mass dosing has not been solved yet. Therefore, review and analysis of feeders for solid organic fertilizer spreaders, as well as experiment results on dosing bunker functioning for peat dosing prove belt feeder to be the most promising in terms of dosing and feeding stability.

Key words: *agricultural science, agricultural production, feeders, spreaders, organic fertilizers.*

Введение

Поддержка со стороны аграрной науки способствует функционированию сельскохозяйственного производства на конкурентоспособном уровне [1–5]. Кроме того, имеются разработки технического сопровождения агропромышленного комплекса [6–10]. При этом большую роль играют технические средства и технологии производства сельскохозяйственных культур, в том числе и для выведения новых высокоурожайных сортов, включая горшечные культуры. Эффективность селекционеров во многом зависит от объема и интенсивности их работы. Наилучшим образом получению новых сортов содействуют формируемые селекционно-семеноводческие тепличные комплексы. Неудовлетворительный уровень механизации производственных процессов является существенным сдерживающим фактором. Особо остро стоит задача подготовки грунта и засыпки им горшков. Задача по созданию установки для дозирования сыпучего материала на уровне патентоспособности решена и нашла свое отражение в публикации [11].

Для обоснования ее конструктивных параметров, а также оптимальных режимов функционирования необходимо выполнить обзор и анализ исследований рабочего процесса питателей машин для разбрасывания твердых органических удобрений как ключевого элемента предложенного технического средства. Это позволит осуществить правильный выбор типа питателя.

Цель исследования – предложение по выбору типа питателя технических средств внесения органических удобрений.

Материал и методы исследования

Материалом для исследований служили труды ученых по изучению рабочего процесса питателей технических средств для разбрасывания твердых органических удобрений. В качестве методов исследований были применены обзор и анализ питателей различных типов конструкций: выявление преимуществ и недостатков, а также особенности их функционирования.

Результаты и обсуждение

Машины, применяемые при разбрасывании твердых органических удобрений (ТОУ), делятся на два типа: для разбрасывания из резервуаров (емкость прицепа или же полуприцепа) и для разбрасывания из куч, заблаговременно размещенных на поверхности поля с помощью самосвалов. Несмотря на то что первые многообразны, они имеют общую конструктивную схему, которая состоит из следующих трех ключевых элементов: кузова прицепа или же полуприцепа, служащего резервуаром для удобрений; транспортера, осуществляющего функцию питателя; разбрасывателя, выполняющего задачу по распределению удобрений по поверхности поля. Машины для распределения ТОУ привлекли внимание большого числа уче-

ных. Исследования в этой области ведутся не только по изучению отдельных элементов технологического процесса внесения органических удобрений, но и рабочих органов всего комплекса технологического процесса функционирования разбрасывателя.

Ключевой составляющей частью любой машины для разбрасывания удобрений является питатель. Задача питающего устройства заключается в равномерной и непрерывной подаче удобрений в необходимом количестве к рабочему органу для выполнения основной операции технологического процесса машины.

В трудах, посвященных функционированию как подающих, так и дозирующих устройств разбрасывателей ТОУ, такие исследователи как Г.П. Варламов, Г.В. Баунов, И.А. Христин, разработали классификацию питателей разбрасывателей ТОУ по принципу перемещения массы [12]. Они делятся на следующие группы: толкающие вдоль и поперек кузова; волочащие сплошного и порционного волочения как бесконечных, так и конечных редкопланчатых устройств, в том числе скребкового и шнекового вида; несущие ленточного, планчатого и жалюзийного типа; вибрационные с наклонным днищем (рис.).

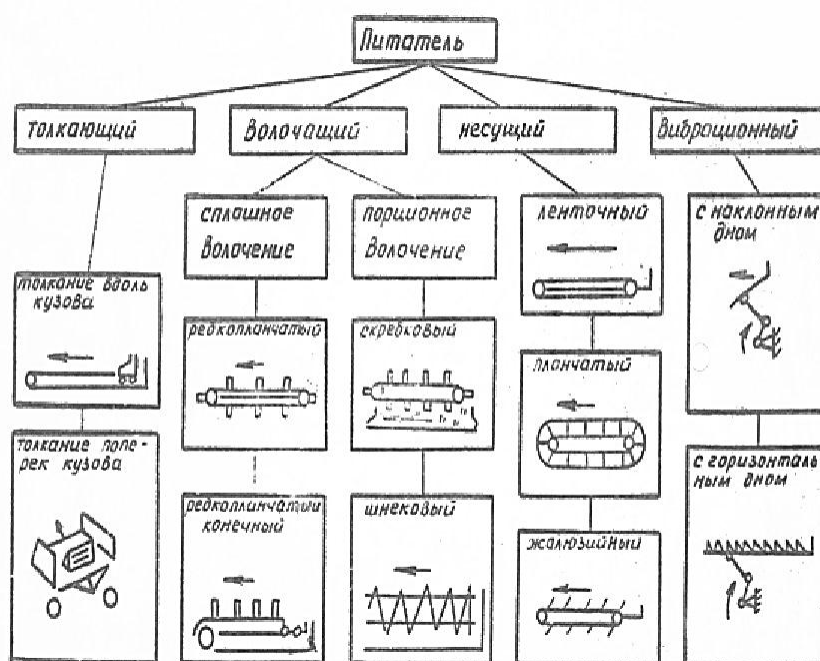


Рисунок – Классификация питателей разбрасывателей твердых органических удобрений

С.Д. Сметнев представил тип питателя в форме толкающей стенки и дал обоснование его ключевых параметров [13].

Иностранные производители рассматриваемых технических средств в качестве питателей применяют конечные транспортерные устройства с подвижными стенками.

По мнению Г.П. Варламова, положительные стороны конечных транспортеров до сих пор не установлены, в то же время подвижные стенки при эксплуатации ведут к уплотнению массы перед подачей к разбрасывающим техническим устройствам, работая на распирание бортов кузова машины. Механизм возврата подвижной стенки, который осуществляется механическим путем, очень сложный. К тому же большой проблемой таких транспортерных устройств является сложность повторной навески их на прицеп для его функционирования в качестве транспортной машины. По этой причине и ввиду высокого расхода мощности на перемещение сыпучего материала иностранные аграрии существенно сократили использование таких транспортеров [14].

Значительным недостатком редкопланчатых транспортеров являлась прерывистость подачи удобрений.

Самые высокие качественные характеристики присущи ленточным, в том числе планчатым, а также жалюзийным устройствам питателей. Но последние два типа питателей по причине избыточной массы не нашли широкого применения.

Ленточные питатели отличались простотой конструкции. Им был свойственен малый расход энергии. В.Д. Варсанюфьев и О.В. Кузнецов отмечали, что мощность, необходимая для привода в действие ленточных питателей, колебалась в диапазоне от 2 до 40 кВт, к тому же большая доля приходилась на пусковой момент. Производительность у них варьировалась в пределах $W = 5 + 2500$ т/ч, значение скорости движения ленты $V_{ленты} = 0,3-30$ м/мин [15].

В связи с отсутствием теоретического обоснования при расчетах ленточных питателей выполняют приближенным аналитическим методом, применяя результаты экспериментальных исследований.

Производительность питателя ленточного типа Q определяется по следующей зависимости:

$$Q = 60 v \gamma \alpha \beta, \quad (1)$$

где v – скорость движения ленты, м/мин; γ – объем массы, т / м³; α – толщина слоя материала на питателе, м; β – ширина ленты, м.

Потребляемая мощность в варианте прямоугольного отверстия рассчитывается по выражению:

$$N = \frac{2\gamma B^2 Lv}{6,12}, \quad (2)$$

где B – ширина выпускного отверстия, м; L – длина выпускного отверстия, м.

Основным преимуществом скребковых конструкций питателей являлась их универсальность: они были способны хорошо работать при использовании различных видов сыпучих материалов. Большой минус представляла высокая энергоемкость, в том числе повышенный износ, поскольку перемещение скребка вызывало большое сопротивление при трении скребка, а также материала о желоб.

Кроме того, при равном значении производительности скребковые конструкции питателей имели большие габариты, также у них были ограничения по скорости движения скребков. К отрицательным качествам вибрационных питателей относилось отклонение в производительности, что негативно сказывалось на равномерности подачи используемого материала [15]. С целью повышения качественных показателей шнековых конструкций питателей кроме применения переменного шага винтов сообщают устройству вибрационное движение, а это ведет к усложнению всей машины.

Насколько конструкция питателя совершенна, В.Д. Варсанюфьев и О.В. Кузнецов предложили определять по значению удельных затрат на выпуск 100 т материала, стоимости выпуска 1 т материала в корреляции с производительностью питателя. При оценке по вышеперечисленным критериям, самые лучшие качественные характеристики продемонстрировали ленточные питатели.

Самое широкое применение (несмотря на серьезный минус – планки и цепи нередко «всплывают», цепи чрезмерно натягиваются, а также рвутся) получили цепочно-планчатые конструкции транспортеров.

Г.П. Варламов и другие привели результаты комплексных исследований конструкций подающих технических устройств машин для разбрасывания удобрений, в том числе по выбору их рационального типа [16].

Для разработки транспортных технических средств навозоразбрасывателей исследования содержали два крупных этапа: определение качественных показателей функционирования транспортеров и силовых и энергетических характеристик.

Опираясь на результаты проведенных исследований, авторы предложили для кузовных устройств разбрасывателей бесконечные цепочно-планчатые транспортеры, оснащенные планками М- и Г-образного профиля на расстоянии 300–400 мм относительно друг друга.

Г.В. Базунов, Г.П. Варламов, С.Н. Никулин не исключали применение двух цепных транспортеров как подающих технических устройств машин для разбрасывания навоза [17]. Авторы исследовали собственно рабочий процесс перемещения используемого материала в кузове разбрасывателя навоза двух цепных транспортеров и определили значение давления навоза как на борту, так и на пол конструкции кузова для обоснования оптимального расстояния между планками, включая взаимное размещение цепей, в том числе внутренних габаритов кузова. Также выполнен труд содержит информацию об определении энергетических затрат для осуществления привода транспортера. Для осуществления уточненного расчета производительности функционирования цепочно-планчатого транспортера Г.В. Базунов, С.Н. Никулин рекомендовали ввести коэффициент использования реального объема кузова [18].

Н.М. Марченко и Б.П. Черников, решая задачу поиска путей модернизации технических средств для разбрасывания органических удобрений, установили, что качество функционирования этих машин коррелирует с конструктивными особенностями исполнительных органов, в том числе условий эксплуатации, а также физико-химических свойств удобрений [19].

Они пришли к выводу, что материал, из которого изготовлен кузов, существенного влияния на качественные показатели работы машины не оказывает.

А.Е. Шебалкин осуществил обоснование параметров цепочно-планчатого транспортера технических средств для внесения твердых органических удобрений из условия движения перемещаемой массы без обрушения [20]. Он же в результате выполненных экспериментальных исследований выявил, что для дозирования в большегрузных машинах необходимо использовать устройство, включающее два транспортера, размещенных последовательно на разных уровнях [20].

Обзор и анализ исследований рабочего процесса питателей технических средств для разбрасывания твердых органических удобрений позволил выдвинуть рабочую гипотезу по обоснованию ленточного питателя как наиболее перспективного для дозирующих технических средств почвенных грунтов, в частности торфа [21–23].

Заключение

Несмотря на некоторые положительные результаты исследований, посвященных изучению подающих и дозирующих рабочих органов машин для разбрасывания твердых органических удобрений, задача равномерного перемещения по бункеру с последующим дозированием сыпучей массы в целом не решена. Поэтому обзор и анализ технических средств питателей разбрасывателей твердых органических удобрений, а также результаты поисковых опытов по изучению функционирования бункера-дозатора для дозирования торфа позволяют сделать вывод о том, что ленточный тип питателя является наиболее перспективным в плане дозирования и стабильности подачи.

Библиография

1. Чубарева М.В. Обоснование режимов вентилирования в процессе сушки зернового вороха в условиях Восточной Сибири // Аграрная наука – сельскому хозяйству: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2006. – С. 306–309.
2. Алтухов И.В., Очиров В.Д. Теплофизические характеристики как основа расчета постоянной времени нагрева сахаросодержащих корнеплодов в процессах тепловой обработки // Вестник КрасГАУ. – 2010. – № 4 (43). – С. 134–139.

3. Асалханов П.Г., Иванько Я.М. О некоторых алгоритмах прогнозирования дат технологических операций возделывания зерновых культур // Вестник ИрГСХА. – 2011. – № 47. – С. 116–121.
4. Арданов Ч.С.Е., Шуханов С.Н., Болоев П.А. Модернизация сухого способа очистки корнеклубнеплодов // Тракторы и сельхозмашины. – 2014. – № 6. – С. 13–14.
5. Ильин П.И., Цэдашиев Ц.В., Цэдашиева Л.Н. Сушка семян зерновых культур в условиях мелкооварного производства // Актуальные вопросы аграрной науки. – 2017. – № 24. – С. 48–54.
6. Алтухова Т.А., Шуханов С.Н. Обзор и анализ исследований охладителей зерна как основа для создания более совершенных машин // Аграрная наука. – 2018. – № 3. – С. 68–69.
7. Беломестных В.А., Агафонов С.В., Кузьмин А.В. Эксплуатационная надежность зерноуборочных комбайнов РСМ – 142 "AKROS" // Актуальные вопросы инженерно-технического и технологического обеспечения АПК: материалы VIII Нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием «Чтения И.П. Терских», посвященной 85-летию Иркутского ГАУ. – Иркутск, 2019. – С. 20–27.
8. Поляков Г.Н., Солодун В.И., Шуханов С.Н. Состав и изменение структуры сельскохозяйственных машин для почвообработки в Иркутской области // Известия Международной академии аграрного образования. – 2019. – № 47. – С. 28–32.
9. Шуханов С.Н., Свинцова О.Н., Сухаева А.Р. и др. Модернизация аппарата для мойки корнеклубнеплодов // Известия Оренбургского гос. агр. ун-та. – 2023. – № 5 (103). – С. 130–134.
10. Смелик В.А., Новиков М.А., Перекопский А.Н. и др. Послеуборочная обработка зерна и семян в условиях регионов повышенного увлажнения. – СПб., 2023.
11. Шуханов С.Н. Совершенствование технических средств дозирования торфа при выращивании горшечных культур // Агропромышленные технологии Центральной России. – 2017. – № 3 (5). – С. 75–79.
12. Варламов Г.П., Базунов Г.В., Христин И.А. О рациональном типе подающего механизма навозоразбрасывателя // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1968. – № 6. – С. 29–31.
13. Сметнев С.Д. О питателе для разбрасывания удобрений // Труды ВИМ. – М., 1966. – Т. 42. – С. 43.
14. Варламов Г.П. Исследование и совершенствование рабочих органов и приспособлений для внесения органических удобрений: отчет ВИСХОМ по теме 1002. Шифр темы 42 – 66. – М., 1968. – 94 с.
15. Варсановьев В.Д., Кузнецов О.В. Современные конструкции питателей для бункеров транспортирующих систем // Обзор НИИИНФОРМТЯЖМАШ. – М., 1976. – С. 54.
16. Варламов Г.П., Базунов Г.В., Христин И.А. О рациональном типе подающего механизма навозоразбрасывателя // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1968. – № 6. – С. 29–31.
17. Базунов Г.В., Варламов Г.П., Никулин С.Н. Исследование двухцепных подающих транспортеров навозоразбрасывателей // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1969. – № 7. – С. 28–30.
18. Базунов Г.В., Никулин С.Н. Результаты исследования некоторых параметров питающего транспортера навозоразбрасывателя // Механизация сельскохозяйственного производства. – М.: Московский рабочий, 1969. – Ч. I. – С. 16–17.
19. Марченко Н.М., Черников В.П. Пути совершенствования разбрасывателей органических удобрений // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1977. – № 1. – С. 13.
20. Шебалкин А.Е. О неравномерности дозирования твердых органических удобрений двухтранспортерным устройством. – М.: НТБ ВИМ, 1982. – Вып. 49. – С. 36–40.
21. Шуханов С.Н., Степанов Н.В., Косарева А.В. и др. Обоснование рабочей гипотезы конструкции бункера-дозатора для засыпки горшков торфом // Инновационные технологии в АПК: теория и практика: сб. ст. XI Междунар. науч.-практ. конф. / под науч. ред. А.А. Галиуллина, В.А. Кошеляева, О.А. Тимошкина. – Пенза, 2023. – С. 312–318.
22. Бураев М.К., Шистеев А.В., Бураева Г.М. и др. Проблемы технического сервиса агропромышленного комплекса региона // Вестник ВСГУТУ. – 2022. – № 3. – С. 56–62.
23. Петунов С.В., Раднаев Д.Н., Дамбаева Б.Е. Технология приготовления компоста методом фракционирования // Вестник ВСГУТУ. – 2021. – № 2. – С. 40–46.

Bibliography

1. Chubareva M.V. Justification of ventilation modes in the process of drying grain heap in conditions of Eastern Siberia // Agrarian science – to agriculture. International scientific and practical conference: collection of articles, 2006. – P. 306–309.

2. *Altukhov I.V.* Thermophysical characteristics as a basis for calculating the heating time constant of sugar-containing root crops in heat treatment processes // Bulletin of KSAU. – 2010. – N 4 (43). – P. 134–139.
3. *Asalkhanov P.G.* On some algorithms for predicting dates of technological operations of grain cropping operations // Vestnik IrGSHA. – 2011. – N 47. – P. 116–121.
4. *Ardanov Ch.S.E.* Modernization of dry method of cleaning root crops // Tractors and Agricultural Machinery. – 2014. – N 6. – P. 13–14.
5. *Ilyin P.I.* Drying of grain crop seeds in small-scale production // Current issues of agrarian science. – 2017. – N 24. – P. 48–54.
6. *Altukhova T.A.* Review and analysis of grain cooler research as a basis for creating more advanced machines // Agrarian science. – 2018. – N 3. – P. 68–69.
7. *Belomestnykh V.A.* Operational reliability of grain harvesting combines RSM – 142 «AKROS» // Actual issues of engineering, technical and technological support of the agro-industrial complex. Proceedings of the VIII National scientific and practical conference with international participation "Readings of I.P. Terskikh", commemorating the 85th anniversary of the Irkutsk State Agrarian University. – 2019. – P. 20–27.
8. *Polyakov G.N.* Composition and change in the structure of agricultural tillage machinery in the Irkutsk region // Proceedings of the International Academy of Agrarian Education. – 2019. – N 47. – P. 28–32.
9. *Shukhanov S.N.* Modernization of the apparatus for washing root crops // Izvestia Orenburg State Agrarian University. – 2023. – N 5 (103). – P. 130–134.
10. *Smelik V.A.* Post-harvest processing of grain and seeds in regions with high moisture. – SPb, 2023.
11. *Shukhanov S.N.* Improving technical means of peat dosing when growing potted crops // Agro-industrial technologies of Central Russia. – 2017. – N 3 (5). – P. 75–79.
12. *Varlamov G.P.* On the rational type of feeding mechanism of a manure spreader // Tractors and Agricultural Machinery. – 1968 – N 6 – P. 29 – 31.
13. *Smetnev S.D.* Spreading fertilizer feeder // Proceedings of All-Russian Research Institute of Mechanization. – M., 1966 – Vol. 42. – P. 43.
14. *Varlamov G.P.* Research and improvement of working bodies and devices for organic fertilizer application: report of All-Union Research Institute of Agricultural Machine Building on topic 1002. Topic code 42–66. – M., 1968. – 94 p.
15. *Varsanofyev V.D.* Modern designs of feeders for bunkers of transport systems // Review of Research Institute for Information on Heavy Power and Transportation Engineering. – M., 1976. – P. 54.
16. *Varlamov G.P.* Rational feeding mechanism of manure spreaders // Tractors and Agricultural Machinery. – 1968. – N 6. – P. 29–31.
17. *Bazunov G.V.* Research of double-chain feeding conveyors of manure spreaders // Tractors and Agricultural Machinery. – 1969. – N 7. – P. 28–30.
18. *Bazunov G.V., Nikulin S.N.* Study results of some parameters of manure spreader feed conveyor // Mechanization of agricultural production. – M.: «Moskovsky rabochiy» Publ. House., 1969. – Vol. 1. – P. 16 – 17.
19. *Marchenko N.M.* Ways to improve organic fertilizer spreaders // Mechanization and Electrification of Agriculture. – 1977. – N 1. – P. 13.
20. *Shebalkin A.E.* Dosing unevenness of solid organic fertilizers with two-conveyor device // Scientific and Technical Library of All-Russian Research Institute of Mechanization – M., 1982. – Issue 49. – P. 36–40.
21. *Shukhanov S.N.* Justification of working hypothesis for the design of a dosing hopper for filling pots with peat // Innovative technologies in the agro-industrial complex: theory and practice. Collection of articles of the XI International Scientific and Practical Conference. Ed. by A.A. Galiullina, V.A. Koshelyaeva, O.A. Timoshkina. – Penza, 2023. – P. 312–318.
22. *Buraev M.K., Shisteev A.V., Buraeva G.M. et al.* Problems of technical service in agro-industrial complex of Baikal region // ESSUTM Bulletin. – 2022. – N 3. – P. 56–62.
23. *Petunov S.V., Radnaev D.N., Dambaeva B.E.* Technology of compost preparation by fractionation method // ESSUTM Bulletin. – 2021. – N 2. – P. 40–46.

DOI 10.53980/24131997_2024_4_59

Ю.Ж. Дондоков, канд. техн. наук, доц.

И.Н. Аммосов, ст. преподаватель

В.М. Дринча, д-р техн. наук, проф., e-mail: vdrincha@list.ru

Т.И. Афанасьева, ст. преподаватель

Т.А. Парникова, ст. преподаватель

Арктический государственный агротехнологический университет, г. Якутск

УДК 644.6/7

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ СУШКИ И ХРАНЕНИЯ СЕМЯН

Рассмотрены основные задачи интегрированной сушки и хранения семян сельскохозяйственных культур. Среди обсуждаемых тем: снижение влажности семян до безопасного уровня; охлаждение высушенного зерна до условий окружающей среды; очистка семян до и после сушки. Приведен сравнительный анализ естественной сушки воздухом, низко температурной сушки, драйэрации и комбинированной сушки. Показана целесообразность использования перемешивающих устройств зерновой массы и энергии биомассы в установках для интегрированной сушки и хранения семян. Представлена конструктивно-технологическая классификация способов конвективной сушки семян. Обоснован процесс конвективной сушки семян в толстом слое. Определена послойная влажность семян при конвективной сушке семян в толстом слое. Основными критериями, которые следует учитывать при оценке различных методов сушки, являются качество зерна, энергоэффективность, производительность, эксплуатационные расходы и опыт оператора сушки. Интегрированные системы сушки и хранения семян приводят к улучшению качества зерна по сравнению с высокотемпературной сушкой. Аэрационная сушка естественным воздухом обеспечивает наилучшее качество семян (при правильной эксплуатации) и является менее энергозатратной, однако характеризуется низкой производительностью и требует высококвалифицированных операторов сушки. Представлены стратегии управления вентиляторами и нагревателями для аэрационной сушки семян.

Ключевые слова: *семена, влажность семян, температура семян, температура воздуха, относительная влажность воздуха, равновесная влажность семян, агент сушки, аэрационная сушка, долговечность семян, жизнеспособность семян, всхожесть семян, сушка семян в насыти, напольная сушилка.*

Yu.Zh. Dondokov, Cand. Sc. Engineering, Associate Prof.

I.N. Ammosov, senior lecturer

V.M. Drincha, Dr. Sc. Engineering, Prof., vdrincha@list.ru

T.I. Afanasyeva, senior lecturer

T.A. Parnikova, senior lecturer

Arctic State Agrotechnological University, Yakutsk

TECHNOLOGICAL BASICS OF INTEGRATED GRAIN DRYING AND STORAGE SYSTEMS

The paper reviews objectives of integrated drying and storage of agricultural seeds. Among the topics discussed are: decreasing moisture content of seeds to safe levels; cooling dried grain to ambient conditions; cleaning seeds before and after drying. The study presents comparative analysis of natural air drying, low-temperature drying, drayage and combined drying. It also demonstrates reasonability of using of grain mass stirring devices and biomass energy in plants for integrated seed drying and storage. The design and technological classification of seed convective drying methods is presented. The process of seed convective drying in thick layer is rationalized. The study determines seed layer-by-layer moisture content during convective seed drying in a thick layer. The main criteria to be considered are grain quality, energy efficiency, capacity, operating costs, and farmer expertise. Integrated seed drying and storage systems lead to improved

grain quality compared to high temperature drying. Natural air drying produces the best quality (if properly operated), and needs the least amount of energy. However, its capacity is low and it requires the most attention and expertise of farmers. The strategies for controlling fans and heaters for bulk or aerated seed drying are presented.

Key words: *seed, seed moisture content, seed temperature, air temperature, air relative humidity, seed equilibrium moisture content, drying air, aerated drying, seed survival, seed viability, seed germination, bulk seed drying, on floor dryer.*

Введение

Зерновые культуры сыграли важную роль в развитии человеческой цивилизации и на протяжении тысячелетий являлись основой питания человека. Пшеница, рис и кукуруза, на которые приходится 89 % общего объема производства, являются тремя наиболее широко потребляемыми зерновыми культурами в мире. Оставшаяся доля в структуре мирового зернопроизводства приходится в основном на рожь, овес, ячмень, просо и сорго [1–3].

В мире ежегодно из-за повышенной влажности теряется большой объем высококачественных семян, пригодных для посева. Содержание влаги в семенах является одним из факторов, определяющих возможность кратковременного и долгосрочного безопасного хранения семян без потери их всхожести и энергии прорастания [4–6].

При высокой влажности семян они могут нагреваться, и в них могут образоваться различные плесневые грибки. Поэтому крайне важно убедиться, что убранные семена имеют безопасную влажность перед закладкой их на хранение. Семена часто убирают, когда содержание влаги в них выше, чем необходимо для безопасного хранения. Безопасное содержание влаги в семенах зависит от вида сельскохозяйственной культуры, но обычно для краткосрочного хранения семян основных зерновых культур приемлемым считается значение 14 % и меньше [7–9].

Большинство партий семян с высокой влажностью можно сохранить для семенных целей, если их правильно высушить. В процессе сушки семена могут подвергаться термическим повреждениям несколькими способами. Во-первых, семена чувствительны к высокой температуре, в зависимости от вида. Они также могут быть повреждены слишком быстрой сушкой или пересушкой. Для получения хороших показателей сушки необходимо контролировать влажность семян, глубину семян в насыпи, температуру агента сушки и расход воздуха [10–12]. Специалисты семеноводческих хозяйств стремятся быстро высушить убранные семена путем применения высокотемпературной сушки, которая во многих случаях приводит к снижению жизнеспособности и энергии прорастания семян. Влияние высокой температуры агента сушки наиболее губительно сказывается при высокой влажности семян [13–15].

Целью сушки семян является снижение интенсивности их дыхания путем удаления избыточной влаги и предотвращение ухудшения качества семян при хранении, которое может возникнуть из-за роста микроорганизмов и деятельности насекомых и клещей [16].

На процесс сушки семян существенное влияние оказывают климатические условия во время уборки урожая. В сухом климате семена могут поступать на хранение прямо из комбайна. Во влажных регионах необходимы специальные системы сушки для высоковлажного семенного материала. При этом сушильное предприятие обычно включает отделение временного хранения высоковлажных семян с развитыми системами аэрации, предварительной очистки, а также очистки семян после прохождения сушки [17, 18].

Искусственная сушка может снизить всхожесть сельскохозяйственных семян и привести к появлению аномальных всходов. Она влияет на водовоздухопроницаемость оболочки семян и может привести к разрушению ферментов. При впитывании влаги зародышем и его набухании твердая внешняя оболочка семян является источником механических разрушений и трещин. Характерным свойством сельскохозяйственных семян является то, что они могут выдерживать обезвоживание и оставаться жизнеспособными, даже если содержание влаги снижается до 5 %.

В некоторых случаях пагубное воздействие сушки зависит от температуры горячего воздуха и времени, в течение которого семена подвергаются его воздействию. В других случаях это, по-видимому, вызвано быстрым высыханием, даже если температура низкая, например, семена сои, высушенные воздухом с относительной влажностью менее 40 %, даже при низких температурах теряют жизнеспособность. Обычно высокотемпературные системы сушки приводят не только к снижению посевных свойств семян, но и к увеличению их хрупкости и подверженности дроблению при обращении с ними (табл. 1) [19].

Таблица 1

Влияние способов сушки на хрупкость высушенного зерна кукурузы

Способ сушки	Здоровые зерновки, без трещин, %	Дробление, %
Традиционный непрерывного действия (высокотемпературный)	8,8	11,3
Высокотемпературная сушка с драйэрацией	60,6	6,7
Комбинированная (двухэтапная)*	82,2	3,9
Естественным воздухом	93,3	1,6

* Первый этап включает высокотемпературную сушку, а второй – низкотемпературную сушку или сушку естественным воздухом.

В общем, температура агента сушки до 45 °С является безопасной, но в сушилках непрерывного действия можно использовать и более высокие температуры, чем в сушилках порционного действия, поскольку время воздействия агента сушки на семена в сушилках непрерывного действия короче. После уборки урожая влажные семена можно сушить при высокой температуре и краткосрочном воздействии агента сушки либо в течение более длительного времени при более низких температурах агента сушки. В практике зерносушения первый подход обычно называют высокотемпературной сушкой, а второй – сушкой естественным воздухом или аэрационной сушкой [20, 21].

Даже если зерно удовлетворительно высушено до безопасного уровня влажности и хранится на складе, имеющем надежную конструкцию, оно все равно может подвергаться риску из-за последствий последовательного увеличения влажности, которое может быть вызвано преобладающими климатическими условиями. Зерно может поглощать влагу непосредственно из воздуха в межзерновом пространстве или путем конденсации при миграции влаги из более теплых в более холодные части зерновой массы [22, 23].

В связи с растущими требованиями к снижению количественных потерь в зернопроизводстве, а также к повышению посевных свойств семенного материала увеличиваются и требования к технологиям послеуборочной обработки семян, и в первую очередь к сушке семян. Наряду с растущими технологическими требованиями на послеуборочную обработку семян на нее все в большей степени довлеют экономические факторы, что приводит к разработке интегрированных процессов сушки и хранения семян. В отечественном сельском хозяйстве данные процессы практически не применяются, а в литературных источниках крайне недостаточно освещены вопросы, связанные с пониманием и развитием интегрированных систем сушки и хранения семян [24].

Целью работы является анализ и исследование общих тенденций процессов сушки семян сельскохозяйственных культур в насыпи и обоснование технологических основ интегрированных систем сушки и хранения семян.

Материалы и методы исследования

Представленные материалы являются обобщенным результатом многолетних экспериментальных исследований авторов статьи, посвященных интегрированию процессов сушки и хранения семян, а также ряда работ зарубежных и отечественных авторов.

В основе интегрированных процессов сушки и хранения семян лежит аэрационная сушка семян естественным или слегка подогретым воздухом (3–5 °С).

Экспериментальные исследования проводились главным образом в хозяйствах Ивановской и Московской областей на зерне пшеницы, ячменя и овса с применением портативных и стационарных установок для аэрирования зерна компании Ambros Schmelzer&Sohn GmbH&Co.KG, (Германия), а также на некоторых типовых аэрируемых зерноскладах отечественного производства.

Для определения влажности и температуры зерна, а также относительной влажности воздуха применялись стандартные методики. Влажность и температуру зерна определяли с помощью финского влагомера Willi-55, погрешность прибора при определении влажности составляла 0,5 %.

Результаты и обсуждение

Традиционные методы сушки, применяемые широко в индустриально менее развитых странах, включают сушку на «корню растений» в поле. Сушка на поле часто означает задержку уборки урожая, что приводит к осыпанию и потерям семян на поле из-за воздействия птиц и грызунов, а также погодных условий. Сушка прошедших физиологическую зрелость семян в полевых условиях увеличивает заболеваемость их плесенью, уровень микотоксинов и повреждение насекомыми существенно возрастает. Кроме того, зерно может подвергаться заражению вредителями, микотоксигенными грибами, что приводит к неоднородной сушке. Сушка до безопасной влажности является обязательным условием, поскольку эффективность химических и нехимических инсектицидов (например, диатомита) снижается по мере увеличения содержания влаги, а показатели гибели насекомых при герметичном хранении снижаются.

В сельском хозяйстве наиболее широкое распространение для уменьшения влажности зерна получила конвективная сушка, основанная на передаче тепла за счет энергии нагретого агента сушки зерновому материалу. Современные технологии конвективной сушки семян обычно уменьшают вероятность снижения качества семян, а также их биологического загрязнения и позволяют полностью высушить до безопасного уровня влажности, выполнить сушку быстрее, чем традиционные способы. Однако при этом особое внимание должно быть уделено вопросам выбора систем сушки и их режимов в зависимости от видов семян. По конструктивно-технологическим признакам зерновые сушилки классифицируются на два основных класса: сушилки непрерывного действия и порционные сушилки (рис. 1).

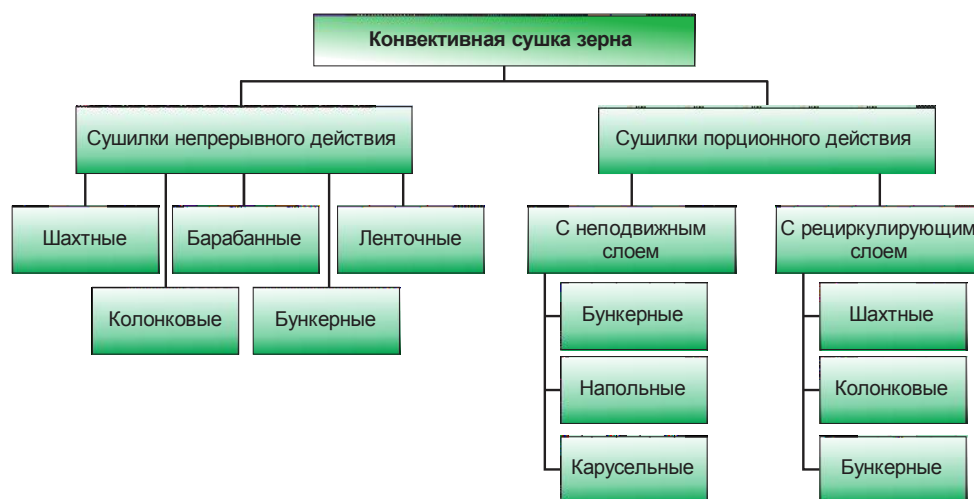


Рисунок 1 – Классификация конвективной сушки семян по конструктивно-технологическим признакам

В практике зерновых хозяйств можно встретить сушилки любого класса и подкласса из приведенной классификации. Вопросы, связанные с выбором способа сушки и самой сушилки, относятся к наиболее сложным в семеноводческих хозяйствах и во многих случаях на данном

этапе совершаются трудноисправимые ошибки, отрицательно влияющие на качество подготовки семян. Основная сложность выбора оптимального решения сушки обусловлена следующими факторами:

- высокая стоимость сушилок;
- сушилка является системообразующей единицей семенного предприятия;
- высокие требования к режимам сушки семян, обусловленные необходимостью сохранения его посевных свойств (всхожести, энергии прорастания и силы роста);
- наличие высококвалифицированных специалистов;
- сложность комбайнового семенного вороха для обработки;
- необходимость применения щадящей сушки для многих видов семян.

Комбайновый ворох семян трав, поступающий на сушку, обладает не только высокой влажностью – 25...40 %, но и содержит кроме основных семян около 75...85 % в значительной мере влажных посторонних органических примесей, пленки и другие части растений. Вследствие высокой влажности, большого содержания примесей, а также низкой сыпучести (табл. 2) такой материал является труднообрабатываемым, зависающим в приемных емкостях, транспортирующих устройствах и в самих сушилках [25].

Таблица 2

Насыпная плотность семян основных злаковых культур

Семена	Насыпная плотность, кг/м ³
Овсяница луговая	250
Овсяница красная	180
Тимофеевка луговая	390
Райграс английский	280
Райграс многоукосный	270
Райграс гибридный	270
Мятлик луговой	200
Плевел однолетний	270
Ежа сборная	210

Семенные смеси данного типа быстро самосогреваются от интенсивного дыхания и подвергаются двухэтапной щадящей аэрационной сушке с применением напольных сушилок. Высоту насыпи в напольных сушилках рекомендуется ограничивать до 80 см. Для предотвращения образования конденсационной влаги рекомендуется слой семян постоянно рыхлить. При применении дополнительного нагрева воздуха его температура не должна превышать 40 °С. При одном этапе сушки максимальный влагосъем не должен превышать 3...5 %. После завершения сушки следует обязательно производить аэрационное охлаждение. Семена злаковых трав можно хранить при влажности 14 % и ниже.

Приведенный выше пример способа сушки семян трав широко применяется в хозяйствах, производящих семена трав. Приведенный способ сушки семян является порционным с неподвижным слоем на напольных сушилках и относится к аэрационной сушке. С целью повышения эффективности предприятий послеуборочной обработки и хранения семян особый интерес представляет процесс интегрированной конвективной сушки семян и хранения. То есть семена сушатся там, где и происходит хранение [26, 27].

Для развития интегрированных технологий сушки и хранения семян чрезвычайно важно понимание физической сущности процесса конвективной аэрационной сушки в плотном слое (рис. 2).

На рисунке 2 показано развитие и перемещение фронта сушки семян от воздухоподводящего перфорированного основания к поверхности слоя. Нижние зерновые слои, находящиеся на перфорированном воздухоподводящем основании, достигают равновесной влажности с поступающим воздухом (агентом сушки). Фронт сушки представляет собой слой, в котором

происходит обезвоживание зерна. Насыщенный влагой воздух через вышележащий слой выходит в атмосферу, который может увлажняться от испаряемой влаги в области фронта сушки.

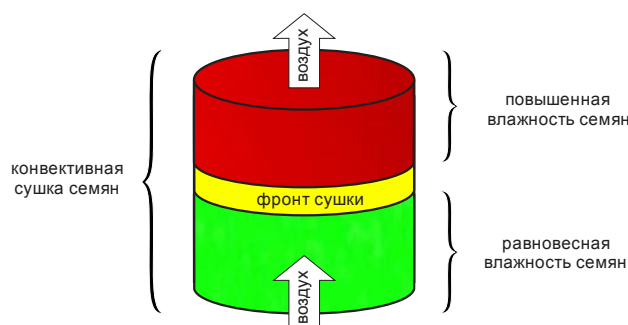


Рисунок 2 – Схема процесса конвективной сушки семян в толстом слое

Для качественного управления процессом сушки следует постоянно контролировать перемещение фронта сушки в зерновой насыпи путем измерения влажности по всей высоте насыпи. Основным критерием обеспечения качественной сушки является прохождение фронта сушки по всей высоте слоя во избежание исключения порчи увлажненных верхних слоев насыпи. Во избежание пересушки зернового слоя ниже зоны сушки следует контролировать относительную влажность воздуха, используемого в качестве агента сушки, и равновесную влажность семян в нижнем слое.

Понятие равновесной влажности семян чрезвычайно важно для управления сушкой семян, поскольку она определяет минимальную влажность, до которой семена могут быть высушены при требуемых параметрах и условиях сушки. Равновесная влажность семян определяется как содержание влаги в семенах после того, как они находились в определенной воздушной среде в течение неограниченно длительного периода времени. В качестве альтернативного определения равновесную влажность семян можно определить как влажность, при которой внутреннее давление паров семян находится в равновесии с давлением паров окружающего воздуха. Равновесная влажность зависит от относительной влажности воздуха, видов семян, сорта, спелости и температуры (рис. 3) [13, 28].

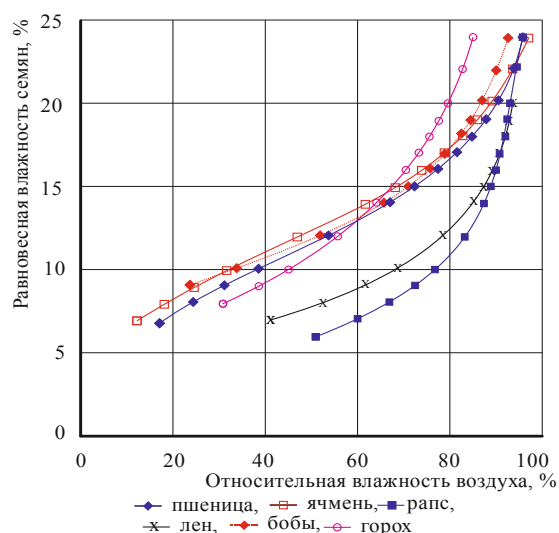


Рисунок 3 – Зависимости равновесной влажности семян от относительной влажности воздуха семян основных сельскохозяйственных культур

Таким образом, в процессе аэрационной сушки требуется решение компромиссной задачи: предотвращение снижения качества семян верхний слоев насыпи и минимизация пересушки нижних слоев. Теоретическое решение данной проблемы является сложной задачей,

так как на компромиссное решение оказывает влияние комплекс свойств, связанных непосредственно с биологическими свойствами самих семян и внешними факторами среды, которые постоянно меняются. Для решения данной проблемы на практике требуются высококвалифицированные операторы управления данными типами сушилок, что является сдерживающим фактором широкого внедрения аэрационной сушки, а также интегрированных систем сушки и хранения семян.

На основании многочисленных собственных экспериментов, а также обширного анализа результатов исследований других авторов разработаны стратегии управления аэрационной сушки семян (табл. 3).

Таблица 3

Стратегии управления вентиляторами и нагревателями при аэрационной сушке

Стратегия	Преимущество	Недостаток
Вентиляторы работают непрерывно, дополнительное тепло не потребляется	Низкие капитальные затраты Зерно сохраняется прохладным, даже если воздух слишком влажный для сушки	Не обеспечивается надежная сушка зерна до безопасной влажности из-за высокой относительной влажности окружающего воздуха в конце сезона
Вентиляторы вкл/выкл в зависимости от влажн. самого влажного зерна и относительной влажн. воздуха: свыше 20 % вз* – 100 % ов** 18...20 % вз – 83 % ов 16...18 % вз – 72 % ов ниже 16 % вз – 62 % ов	Уменьшение расходов, когда возможна сушка	Увеличивается время сушки в сырую погоду, что может привести к порче. Существует вероятность пересушивания семян в слое над воздухоподводящей перфорированной поверхностью
Вентиляторы работают непрерывно, теплонагреватель*** вкл/выкл в зависимости от относительной влажности воздуха	Относительная влажность воздуха может быть уменьшена, что позволяет проводить сушку в сырую погоду. Сушка в часы пониженной нагрузки может снизить расходы на электроэнергию	Влажное зерно становится теплым, что ускоряет его порчу. Вероятность пересушивания семян в слое над воздухоподводящей перфорированной поверхностью
Сложные стратегии с компьютерным моделированием	Контроль эксплуатационных расходов, максимизирование производительности сушки и избегание пересушивания	Еще не полностью разработаны и не проверены. Стоимость контроллера может быть высокой

* – Влажность зерна; ** – относительная влажность воздуха; *** – подогрев воздуха на 3–5 °С.

Для повышения универсальности аэрационной сушки, т. е. при проведении сушки и во влажную погоду, следует применять дополнительный нагрев окружающего воздуха перед его поступлением во всасывающее отверстие вентилятора. Применение дополнительного нагрева обеспечивает снижение относительной влажности воздуха, чрезмерный нагрев воздуха при аэрационной сушке может привести к сильному пересушиванию нижнего слоя семян, непосредственно соприкасающегося с воздухоподводящей поверхностью. При этом инвестиционные и эксплуатационные расходы на аэрационную сушку увеличиваются.

Эффективным технологическим приемом повышения эффективности аэрационной сушки является применение вертикальных шнековых перемешивающих устройств, устанавливаемых на подвесных двухопорных балках. При этом шнеки перемещаются по всей площади зерновой насыпи, смешивая сухое и недосушенное зерно. Применение зерновых смесителей ускоряет перемещение фронта сушки по высоте зерновой насыпи и снижает риск пересушки зерна на опорной воздухоподводящей поверхности.

Для интегрированных систем сушки и хранения семян особый интерес представляют топочные агрегаты, работающие на растительном сырье. Выработки газа-теплоносителя из растительного сырья уступают эффективности топочным устройствам энергетических котлов,

их КПД редко превышает 70...72 %, но при этом благодаря дешевизне топлива, простоте конструкции и надежности работы они являются конкурентоспособными топками на жидком и газообразном топливе, широко используемым в сельском хозяйстве при сушке семенного зерна.

Заключение

1. Потери основных зерновых культур в процессе послеуборочной обработки можно сократить, уменьшив два основных источника потерь при хранении: микробную и качественную деградацию, обусловленные недостаточным удалением влаги из свежубранного зерна, а также количественные и качественные потери из-за насекомых-вредителей.

Интегрированное управление процессами послеуборочной обработки семян, основывающееся на улучшенных процессах сушки и хранения, является важным ресурсом снижения потерь и качества семян при послеуборочной обработке.

2. Соответствующая агротехническим требованиям сушка семян – это первый шаг, необходимый для безопасного хранения семян. Существующие улучшенные технологии сушки семян не являются широкодоступными, и их эффективное применение сдерживается недостаточными знаниями и навыками операторов сушильных отделений семенных предприятий.

3. Представлены стратегии управления вентиляторами и применения дополнительного нагрева воздуха в процессе аэрационной сушки семян. Стратегии управления аэрационной сушкой с применением сложного компьютерного моделирования позволяют осуществлять управление эксплуатационными расходами, максимизировать производительность сушки и избегать пересушивание семян в слое над опорной воздухоподводящей перфорированной поверхностью.

4. Применение компьютерного моделирования для управления процессом аэрационной сушки сдерживается в практике из-за сложности процесса щадящей аэрационной сушки семян, а также высокой стоимости контроллеров.

Библиография

1. *Bidhan Nath, Guangnan Chen, Cherie M. et al.* Research and Technologies to Reduce Grain Post-harvest Losses: A Review // *Foods*. – 2024. – N 13. – P. 1875–1991.
2. *Storage of Cereal Grains and Their Products*. Edited by Kurt A. Rosentrater. Published by Elsevier Inc. in cooperation with Cereals & Grains Association. – 2022. – 737 p
3. *Encyclopedia of grain science*. Edited by Colin Wrigley. Elsevier Academic Press. – 2022. – 1392 p.
4. *Фейденгольд В.Б., Алексеева Л.В., Закладной Г.А. и др.* Меры борьбы с потерями зерна при заготовках, послеуборочной обработке и хранении на элеваторах и хлебоприемных предприятиях // Меры борьбы с потерями зерна при заготовках, послеуборочной обработке и хранении на элеваторах и хлебоприемных предприятиях. – М.: ДеЛи принт, 2007. – 302 с.
5. *Siddique A.B., Wright D.* Effects of different Drying Time and Temperature on Moisture Percentage and Seed Quality (Viability and Vigour) of Pea Seeds (*Pisum sativum L.*) // *Asiant Journal of Plant Sciences*. – 2003. – N 2 (13). – P. 978–982.
6. *Смелик В.А., Новиков М.А., Перекопский А.Н. и др.* Послеуборочная обработка зерна и семян в условиях регионов повышенного увлажнения: монография. – СПб.: Изд-во СПбГАУ, 2023. – С. 162.
7. *Иванов Н.М.* Технологии и техника для послеуборочной обработки зерна и семян: монография / Н.М. Иванов, Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов; СФНЦА РАН. – Новосибирск: Изд-во СФНЦА РАН, 2021. – 277 с.
8. *Дринча В.М., Дондоков Ю.Ж., Аммосов И.Н. и др.* Проблемы и перспективы развития технологий аэрирования зерна // *Вестник ВСГУТУ*. – 2024. – № 3 (94). – С. 30–40.
9. *Стрикунов Н.И., Леканов С.В.* Технологические основы компоновки оборудования семяочистительных линий // *Вестник Алтайского гос. аграр. ун-та*. – 2022. – № 1 (207). – С. 99–104. – DOI: 10.53083/1996-277-2022-207-1-104-108.
10. *McDonald M.B.* Seed deterioration: physiology, repair and assessment // *Seed Science and Technology*. – 1999 – N 27. – P. 177–237.

11. *Ghive D.V., Barabde N.P., Pote S.R.* Seed viability and factors affecting seed storage // *Asian Journal of Bio Sci.* – 2007. – Vol. 2, N 2. – P. 201–204.
12. *Copeland L.O.* Seed longevity and deterioration. Principles of seed science and Technology // *Burges publishing company, Minneapolis, Minnesota.* – 1976. – P. 18–212.
13. *Brooker D.B., Bakker-Arkema F.W., Hall C.W.* Drying and Storage Grains and Oilseeds. – Published by Van Nostrand Reinhold, New York, 1992. – 450 p.
14. *Птицын С.Д.* Зерносушилки. Технологические основы, тепловой расчет и конструкции. – М.: Машиностроение, 1966. – 212 с.
15. *Bala B.K.* Drying and Storage of Cereal Grains // *John Wiley & Sons, Ltd.* – 2017. – 354 p.
16. *McLean K.A.* Drying and storing combinable crops. – *Farming Press Ltd.–London. Suffolk,* 1980. – 281 p.
17. *Дринча В.М., Суколин Л.М.* Технология и комплекс машин для очистки зерна и семян // *Земледелие.* – 1997. – № 3. – С. 34.
18. *Трисвятский Л.А.* Хранение зерна: учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Хранение и технология переработки зерна». – М.: Альянс, 2017. – 350 с.
19. *Saul R.A., Lind E.F.* Maximum time for safe drying of grain with unheated air // *Transactions of the ASAE.* – 1958. – N 10. – P. 96–99.
20. *Шубаев П.Н., Карнов Б.А.* Активное вентилирование семян. – М.: Россельхозиздат, 1969. – 112 с.
21. *Navarro S., Noyes R.* The mechanics and physics of modern grain aeration management. – *CRC Press LLC,* 2012. – P. 647.
22. *Chung D.S., Pfost H.B.* Adsorption and desorption of water vapor by cereals grain and their products // *Transactions of the ASAE.* – 1967. – N 10. – P. 525–575.
23. *Аммосов И.Н., Дондоков Ю.Ж., Юсупов Ш.Т. и др.* Исследование сыпучести зерна и разработка универсального аэратора колонкового типа // *Вестник ВСГУТУ.* – 2024. – № 2 (93). – С. 82–91.
24. *Дринча В.М., Цыдендоржиев Б.Д.* Технологические принципы бункерной сушки зерна // *Тракторы и сельскохозяйственные машины.* – 2011. – № 3. – С. 38–41.
25. *Шнаар Д.* Посевной и посадочный материал. Научно-практическое руководство. Берлин. – 2001. – 800 с.
26. *Natural Air Grain Drying.* Saskatchewan Ministry of Agriculture. – October, 2008. – 14 p.
27. *Morey R.V., Gustafson R.J., Cloud H.A.* Combination high temperature ambient air drying // *Transactions of the ASAE.* – 1981. – N 24 (2). – P. 509–512.
28. *A basic concept of equilibrium moisture* // *Agricultural Engineering.* – 1952. – N 33. – P. 29–31.

Bibliography

1. *Nath B., Chen G., O'Sullivan Ch. M. et al.* Research and Technologies to Reduce Grain Postharvest Losses: A Review // *Foods.* – 2024. – N 13. – P. 1875–1991.
2. *Storage of Cereal Grains and Their Products.* / Ed. by Kurt A. Rosentrater // Published by Elsevier Inc. in cooperation with Cereals & Grains Association. – 2022. – 737 p.
3. *Encyclopedia of grain science.* / Ed. by Colin Wrigley. // Elsevier Academic Press. 2022. – 1392 p.
4. *Feidengold V. B, Alekseeva L.V, Zakladnoy G.A. et al.* Measures to combat grain losses during procurement, post-harvest processing and storage at elevators and grain receiving enterprises // *Measures to combat grain losses during procurement, post-harvest processing and storage at elevators and grain receiving enterprises.* – М., DeLi Print Publishing House, 2007. – 302 p.
5. *Siddique A.B., Wright D.* Effect of different drying times and temperatures on the percentage of moisture and seed quality (viability and viability) of pea seeds (*Pisum sativum L.*) // *Asian Journal of Plant Sciences.* – 2003. – N 2 (13). – P. 978–982.
6. *Smelik V. A., Novikov M.A., Perekopskiy A.N. et al.* Post-harvest processing of grain and seeds in regions with high humidity: monograph. – SPb.: SPbSAU, 2023. – P. 162.
7. *Ivanov N.M.* Technologies and equipment for post-harvest processing of grain and seeds: monograph / N.M. Ivanov, N.I. Strikunov, S.V. Lekanov; SFNCA RAS. – Novosibirsk: Publishing house of SFNCA RAS, 2021. – 277 p.

8. *Drincha V.M., Dondokov Yu.Zh., Ammosov I.N. et al.* Problems and prospects of grain aeration technologies // ESSUTM Bulletin. – 2024. – N 3 (94). – P. 30–40.
9. *Strikunov N.I., Lekanov S.V.* Technological principles of seed cleaning line equipment layout // Bulletin of Altai State Agricultural University. – 2022. – N 1 (207). – P. 99–104. – DOI: 10.53083/1996-277-2022-207-1-104-108.
10. *MacDonald M.B.* Seed deterioration: physiology, reparation and assessment // Seed science and technology, 1999 – N 27. – P. 177–237.
11. *Gaive D.V., Barabde N.P., Pote S.R.* Seed viability and factors affecting seed storage // Asian Journal of Bio Science. – 2007. – Vol. 2, N 2. – P. 201–204.
12. *Copeland L.O.* Seed shelf life and spoilage. Principles of seed production and technology. – Burges Publishing House, Minneapolis, Minnesota, 1976. – P. 18–212.
13. *Brooker D.B., Bakker-Arkema F.W., Hall K.W.* Drying and storage of grain and oilseeds. – Published by Van Nostrand Reinhold, New York, 1992. – 450 p.
14. *Ptitsyn S.D.* Grain dryers. technological fundamentals, temperature calculations and designs. – M.: Mashinostroenie Publishing House, 1966. – 212 p.
15. *Bala B.K.* Drying and Storage of Grain Crops. – John Wiley & Sons, Ltd, 2017. – 354 p.
16. *McLean K.A.* Drying and storage of combined crops. – London: Suffolk, Farming Press Ltd., 1980. – 281 p.
17. *Drincha V.M., Sukonin L.M.* Technology and complex of machines for cleaning grain and seeds // Zemledelie. – 1997. – N 3. – P. 34.
18. *Trisvyatskiy L.A.* Grain storage: a textbook for students of higher educational institutions majoring in «Storage and technology of grain processing». – M.: Alliance Publishing House, 2017. – 350 p.
19. *Saul R.A., Lind E.F.* Maximum time of safe drying of grain with unheated air // Transactions of the ASAE, 1958. – N 10. – P. 96–99.
20. *Shibaev P.N.* Active aeration of seeds. – Rosselkhozizdat Publishing House, 1969. – 112 p.
21. *Navarro S., Noyes R.* Mechanics and physics of modern grain aeration control. – CRC Press LLC, 2012. – P. 647.
22. *Chung D.S., Pfof H.B.* Adsorption and desorption of water vapor by cereal grain and their processed products. // Proceedings of the ASAE. – 1967. – N 10. – P. 525–575.
23. *Ammosov I.N., Dondokov Yu.Zh., Yusupov Sh.T. et al.* Study of grain flowability and design of universal core type aerator // ESSUTM Bulletin. – 2024. – N 2 (93). – P. 82–91.
24. *Drincha V.M., Tsydendorzhiev B.D.* Technological principles of bunker drying of grain // Tractors and agricultural machinery. – 2011. – N 3. – P. 38–41.
25. *Shpaar D.* Sowing and planting material. Scientific and practical guide. – Berlin, 2001. – 800 p.
26. Natural air drying of grain. Saskatchewan Ministry of Agriculture. – October, 2008, – 14 p.
27. *Morey R.V., Gustafson R.J., Cloud H.A.* Combined high-temperature drying with ambient air // Transactions of the ASAE, 1981. – N 24 (2). – P. 509–51.
28. The basic concept of equilibrium moisture content // Agricultural machinery. – 1952. – N 33. – P. 29–31

DOI 10.53980/24131997_2024_4_69

С.С. Ямпиллов, д-р техн. наук, проф., e-mail: yampilovss@mail.ru

Н.А. Нехуров, ассистент

Ж.Б. Цыбенков, канд. техн. наук, доц., e-mail: tsibenov@mail.ru

В.Б. Балданов, канд. техн. наук, доц., e-mail: cakirslava@gmail.com

А.О. Жигжитов, канд. техн. наук, доц.

А.В. Стукалова, аспирант, e-mail: ana-stukalova@yandex.ru

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, г. Улан-Удэ

УДК 631.362

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ЗЕРНОВОГО МАТЕРИАЛА ПО ЛОТКУ СЕПАРАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Сепараторы, использующие техническое зрение, применяются для очистки зернового материала от различных примесей, в частности от примесей, которые отличаются от частиц зерна размерами, цветом, формой, коэффициентом трения и др. С целью обоснования параметров лотка для обработки зерна от примесей была разработана математическая модель, описывающая движения частиц по лотку. Рассмотрено математическое описание движения различных частиц по лотку и представлен принцип работы сепаратора с техническим зрением. Частицы отличаются коэффициентом трения. При математическом моделировании найдено выражение, рассчитывающее интервал между частицами, движущимися по наклонному лотку, учитывающее различие коэффициентов трения частиц, а также длину лотка и угол его наклона.

Ключевые слова: сепаратор, техническое зрение, движение частиц по лотку, коэффициент трения.

S.S. Yampilov, Dr. Sc. Engineering, Prof.

N.A. Nekhurov, Assistant Lecturer

Zh.B. Tsybenov, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

V.B. Baldanov, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

A.O. Zhigzhitov, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

A.V. Stukalova, PG student

East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude

MATHEMATICAL MODEL OF GRAIN MATERIAL PARTICLES MOVEMENT ALONG SEPARATOR TRAY USING MACHINE VISION

Separators using machine vision are used to clean grain material from various impurities, in particular from impurities that differ from grain particles in size, color, shape, friction coefficient, etc. In order to substantiate parameters of the tray for processing grain from impurities, a mathematical model is developed describing movement of particles along the tray. The study considers mathematical description of various particles movement along the tray and presents operating principle of separator with machine vision. Particles differ in friction coefficient. In mathematical modeling, an expression is found calculating interval between particles that move along an inclined tray and taking into account difference in friction coefficients of particles, as well as tray length and angle.

Key words: separator, machine vision, particle movement along tray, friction coefficient.

Введение

Одним из основных способов снижения влажности зернового материала является его очистка от примесей. Низкая влажность зерна снижает активность и количество микроорганизмов, а также время его хранения без ухудшения товарных и потребительских качеств. Удаление примесей из зернового материала – это основной технологический процесс послеуборочной обработки, осуществляющийся на зернотоках. Очистка зернового материала осуществляется на зерноочистительных устройствах, находящиеся в зерноперерабатывающих хозяйствах. Увеличение эффективности работы данных устройств обеспечит сохранность зернового материала и прибыль хозяйств при реализации продуктов высокого качества.

Сегодня во многих регионах увеличилось количество трудноотделимых примесей, находящихся в поступающем исходном зерне из-под комбайна. Отделить их от зерна (большую часть) на существующих зерноочистительных машинах практически невозможно. Однако появились за рубежом и в нашей стране сепараторы для очистки зерна. Данные сепараторы вобрала в себя современные достижения науки и техники. Упомянутые сепараторы применяют для очистки зерна с использованием технического зрения. Поэтому их назвали фото-сепараторами, способными очистить зерновой материал от всех видов сорняков и примесей [1–5]. В настоящее время ведутся научные работы по созданию сепаратора, использующего техническое зрение для очистки зерна от трудноотделимых частиц [6–14].

Цель работы – обоснование параметров лотка (длины, угла наклона, промежутка времени скатывания различных частиц по лотку) сепаратора для очистки зерна с использованием технического зрения.

Материалы и методы исследования

Чтобы эффективно отделить частицы примеси от частиц основного зерна, необходимо иметь промежуток времени между частицами при скатывании частиц по лотку, для распознавания частиц (по размеру, по свету) видеокамерами для увеличения эффективности очистки зерна от примесей. Для обоснования параметров лотка при скатывании частиц различных компонентов зернового материала по лотку, определения разницы интервала движения различных частиц по лотку при обработке поступающего исходного зернового вороха разработано аналитическое описание движения частиц зернового материала в сепараторе, использующего техническое зрение. При математическом описании процесса перемещения частиц зернового материала по лотку были приняты следующие допущения: сопротивление воздуха не учитывалось; подача частиц зернового материала рассматривалась в один зерновой слой; частицы всех компонентов зернового материала считались одинаковыми по размеру и массе. Чтобы понять движение частиц по лотку, следует рассмотреть схему их перемещения и воспользоваться известным выражением [15]:

$$\frac{dv}{dt} = g(\sin\alpha - f\cos\alpha), \quad (1)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; f – коэффициент трения; α – угол наклона к горизонту, град.; v – скорость перемещения зерна, м/с; t – время перемещения зерна, с.

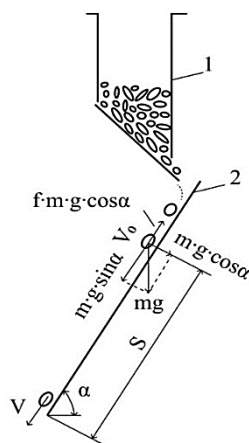


Рисунок 1 – Описание перемещения зерна по наклонной поверхности:
1 – накопитель; 2 – наклонная поверхность

Выражение представим в упрощенном виде:

$$g\sin\alpha - gf\cos\alpha = k. \quad (2)$$

Выражениями представим перемещение двух зерен относительно наклонной поверхности для математического описания:

$$k_1 = g \cdot \sin \alpha - g f_1 \cos \alpha; \quad (3)$$

$$k_2 = g \cdot \sin \alpha - g f_2 \cos \alpha, \quad (4)$$

где f_1 и f_2 – коэффициенты трения соответствующих зерен, перемещающихся по наклонной поверхности.

Поскольку угол наклона поверхности к горизонту, по которой перемещаются два зерна намного выше их угла трения, зерна будут спускаться, причем, неравномерно, приближаясь или удаляясь друг от друга в зависимости от их коэффициента трения f_1 и f_2 . Дистанция между зернами будет возрастать по мере движения, если коэффициент трения первого зерна f_1 будет меньше, чем у зерна следующего за ним f_2 . При равном коэффициенте трения двух зерен расстояния между ними будет оставаться одинаковым по мере движения по наклонной поверхности. Дистанция между зернами будет сокращаться в случае, если коэффициент трения первого зерна f_1 будет больше, чем у зерна следующего за ним f_2 . При данных условиях, когда зерна догоняют друг друга при движении по наклонной поверхности, возникают трудности для технического зрения при идентификации различий и дефективных зерен, а также затрудняется обнаружение примесей для их выделение из зернового материала. При вышерассмотренном условии эффективность очистки снизится.

Таким образом, следует учитывать, что ситуация, когда f_1 больше f_2 , является наихудшим сценарием при использовании сепаратора с техническим зрением.

Скорости перемещения зерен по наклонной поверхности от ее приемной части до момента вылета с нее различаются, поскольку обладают различными коэффициентами трения. Следующие уравнения позволяют найти скорости движения зерен по наклонной поверхности:

$$v_1 = v_0 + k_1 \cdot t; \quad (5)$$

$$v_2 = v_0 + k_2 \cdot (t - t_0), \quad (6)$$

где t – время перемещения первого зерна по наклонной поверхности, с; t_0 – промежуток времени, в течение которого поступает следующее зерно, с; v_0 – исходная скорость зерна при поступлении его на наклонную поверхность, м/с; v_1 и v_2 – скорости перемещения первого и второго зерен, м/с.

Время t_0 рассчитывается по следующему уравнению с учетом того, что зерновой материал движется в один слой:

$$t_0 = \frac{\sqrt{v_0^2 + 2 \cdot k_1 \cdot d} - v_0}{k_1}, \quad (7)$$

где d – размер компонентов зернового материала, м.

Траектория частиц, обрабатываемых в лотке, может быть определена следующими выражениями:

$$s_1 = v_0 \cdot t_1 + \frac{k_1 \cdot t_1^2}{2}; \quad (8)$$

$$s_2 = v_0 \cdot t_2 + \frac{k_2 \cdot t_2^2}{2}, \quad (9)$$

где s_1 и s_2 – путь первого и второго зерен на наклонной поверхности, м; t_1 и t_2 – время движения зерен по пути s , с.

Обычно длина пути S или длина лотка уже известны, поэтому можно определить время t_1 и t_2 следующим образом:

$$t_1 = \frac{\sqrt{v_0^2 + 2 \cdot k_1 \cdot s_1} - v_0}{k_1}; \quad (10)$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{v_0^2 + 2 \cdot k_2 \cdot s_2} - v_0}{k_2}. \quad (11)$$

Длину маршрута, пройденного частицами по лотку за определенный промежуток времени, можно вычислить с использованием следующих формул:

$$s_1 = v_0 \cdot t + \frac{k_1 \cdot t^2}{2}; \quad (12)$$

$$s_2 = v_0 \cdot (t - t_0) + \frac{k_2 \cdot (t - t_0)^2}{2}, \quad (13)$$

где s_1 и s_2 – расстояние, преодоленное зернами, движущимися по наклонной поверхности, за время t , м.

В формуле (13) заменив t на t_1 и вычтя полученное уравнение из выражения (8), получим уравнение нахождения расстояния между зернами в конце наклонной поверхности:

$$s_{\text{ин}} = v_0 \cdot t_0 + \frac{k_1 \cdot t_1^2}{2} - \frac{k_2 \cdot (t_1 - t_0)^2}{2}, \quad (14)$$

где $s_{\text{ин}}$ – интервал между первой и второй частицами в конце лотка, м.

Результаты исследования и их обсуждение

Рассчитали путь, пройденный горохом и пшеницей в зависимости от угла наклона лотка к горизонту. Для этого по выражениям 3 и 4 определили значения k_1 и k_2 , подставляя значения коэффициентов трения пшеницы по стали $f_1 = 0,65$ и коэффициент трения гороха $f_2 = 0,32$. Затем по формуле (7) нашли время t_0 при начальной скорости частиц по скатному лотку $v_0 = 0,95$ м/с и размера гороха $d = 0,005$ м.

Анализ результатов показал (рис. 2), что с увеличением угла наклона лотка к горизонту увеличивался путь, пройденный частицами зернового материала. Поэтому рациональным достаточным углом наклона лотка к горизонту приняли 60° , при котором наблюдалось устойчивое скатывание частиц зернового материала.

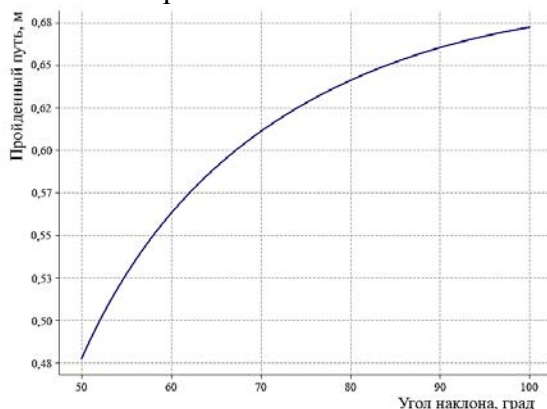


Рисунок 2 – Зависимость пройденного пути частицами зернового материала по лотку от угла наклона лотка

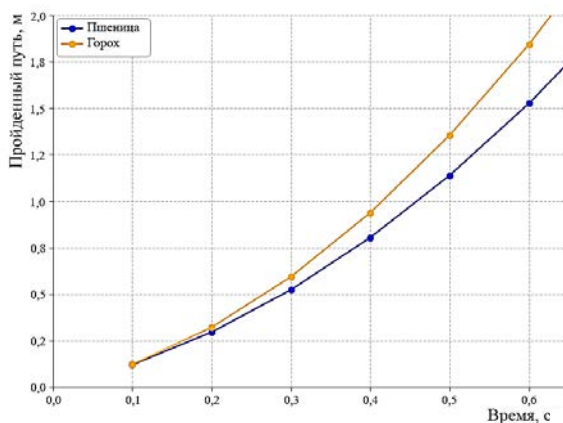


Рисунок 3 – Зависимость от коэффициента трения пути, пройденного пшеницей и горохом

Математическая модель позволила получить графические зависимости интервала между частицами пшеницы и гороха в конце наклонной поверхности от разницы коэффициентов трения частиц компонентов зерна по поверхности (рис. 3). По формуле 14 рассчитали интервал пути между пшеницей и горохом при длине наклонной поверхности $S = 1$ м и угле наклона поверхности к горизонту $\alpha = 60^\circ$.

Анализ результатов показал, что при скатывании частиц гороха и пшеницы по стальному листу интервал между этими частицами достаточен при длине лотка 1 м и угле наклона лотка 60° и составляет 0,56 м, когда время скатывания равно 0,33 с. Это позволило вовремя распознать частицы разных компонентов зернового материала видеокамерами и дать команду эжектору для удаления примеси в емкость отходов.

Заключение

Разработана математическая модель движения частиц зернового материала по лотку сепаратора с использованием технического зрения, которая позволяет обосновать основные параметры скатного лотка. Длина скатного лотка 1 м и угол наклона лотка к горизонту 60° .

Библиография

1. Стукалова А.В., Ямпиллов С.С. Обзор современных фотосепараторов // Вестник ВСГУТУ. – 2024. – № 1. – С. 62–71.
2. Толмачев В.Д., Лебедев Д.В. Актуальность применения фотосепараторов в технологическом процессе // Символ науки. – 2019. – № 6. – С. 234–238.
3. Абидуев А.А., Раднаев Д.Н., Тогмидон А.Ю., и др. Очистка семенного зерна ячменя в условиях Республики Бурятия // Вестник ВСГУТУ. – 2023. – № 1. – С. 46–55.
4. Иванов А.М., Шаронова Т.В., Иванов Д.В. Фотосепараторы для зерна // Студенческая наука – первый шаг в академическую науку: материалы конф. – Чебоксары: Изд-во Чувашской гос. с.-х. академии, 2018. – С. 78–81.
5. Ямпиллов С.С. Технологическое и техническое обеспечение ресурсо- и энергосберегающих процессов очистки и сортирования зерна и семян. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2003. – 196 с.
6. Гиевский А.М., Мяснянкин К.В. Влияние фрикционных свойств обрабатываемых частиц на их фотосепарирование // Вестник Воронежского ГАУ. – 2020. – Т. 13, № 2. – С. 32–38.
7. Мекишун Ю.Н., Овчинников Д.Н., Новикова В.А. и др. Применение фотосепаратора при выделении трудноотделимых примесей // Приоритетные направления развития энергетики в АПК: материалы конф. – Лесниково: Изд-во Курганской гос. с.-х. академии им. Т.С. Мальцева, 2017. – С. 79–82.
8. Лерке В.В., Надвоцкая В.В. Анализ технических характеристик фотосепараторов для технического переоснащения технологической линии // Программно-техническое обеспечение автоматизированных систем: материалы конф. – Барнаул: Изд-во Алтайского гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2019. – С. 17–20.
9. Патент RU №2468872. В07С 5/342 Устройство для сортировки зерна /Ямпиллов С.С. Цыдыпов Ц.Ц., Жигжитов А.О.// Патентообладатели: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления». – Заявка № 2011144345, заявл. 1. 11. 2011, опубл. 10.12.2012.
10. Патент RU №2607537 В07С 5/300 Фотосепаратор / Савинков М.В., Галкин Е.В., Никулин Ю.Н. // Патентообладатели: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Чувашской государственной сельскохозяйственной академии». – Заявка № 207611445, заявл. 17. 11. 2016, опубл. 10.01.2017.
11. Тищенко А.И. Повышение качества сыпучих зерновых продуктов на основе разработки и применения многокритериальных фотоэлектронных сепараторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02 / А.И. Тищенко. – Барнаул, 2000. – 304 с.
12. Мяснянкин К.В., Агеев А.А., Тарасенко А.П. Влияние типа лотков на качество очистки гречихи фотосепаратора // Техника в сельском хозяйстве. – 2014. – № 6. – С. 5–7.

13. Патент RU №2495728 B07B 13/00 Устройство для сортировки зерна /Ямпиллов С.С., Цыдыпов Ц.Ц., Жигжитов А.О., Хаптагаева С.И., Будаев А.Б. // Патентообладатели: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления». – Заявка № 2012121083/03 заявл. 22.05.2012, опубл. 20.10.2013.

14. *Мяснянкин К.В.* Влияние фотосепаратора на качество семян гречихи // Инновационные технологии и технические средства для АПК: тр. Воронежского ГАУ. – Воронеж, 2014. – С. 54–60.

15. *Василенко П.М.* Теория движения частиц по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. – Киев: Изд-во Укр. академии с.-х. наук, 1960. – 283 с.

Bibliography

1. *Stukalova A.V., Yampilov S.S.* Review of modern photoseparators // ESSUTM Bulletin. – 2024. – N 1 – P. 62–71.

2. *Tolmachev V.D., Lebedev D.V.* Relevance of photo separators application in technological process // Symbol of science. – 2019. – N 6. – P. 234–238.

3. *Abiduev A.A., Radnaev D.N., Togmidon A.Yu. et al.* Barley seed grain cleaning under conditions of the Republic of Buryatia // ESSUTM Bulletin. – 2023. – N 1. – P. 46–55.

4. *Ivanov A.M., Sharonova T.V., Ivanov D.V.* Grain photoseparators // Student science – the first step into academic science: conference materials. – Cheboksary: Publishing House of the Chuvash State Agricultural Academy, 2018. – P. 78–81.

5. *Yampilov S.S.* Technological and technical support for resource-saving processes of cleaning and sorting grain and seeds. – Ulan-Ude: Publishing House of ESSUTM, 2003. – 196 p.

6. *Gievskiy A.M., Myasnyankin K.V.* Influence of frictional properties of processed particles on their photoseparation // Vestnik of Voronezh State Agrarian University. – 2020. – Vol. 13, N 2. – P. 32–38.

7. *Mekshun Yu.N., Ovchinnikov D.N., Novikova V.A. et al.* Application of photoseparator in separation of difficult-to-separate impurities // Priority areas for energy development in agro-industrial complex: conference materials. – Lesnikovo: Publishing House of Kurgan State Agricultural Academy after T.S. Maltsev, 2017. – P. 79–82.

8. *Lerke V.V., Nadvotskaya V.V.* Analysis of technical characteristics of photoseparators for technical re-equipment of a process line // Software and hardware for automated systems: conference materials. – Barnaul: Publishing House of Polzunov Altai State Technical University, 2019. – P. 17–20.

9. Patent RU N 2468872 B07C 5/342 Grain sorting device / Yampilov S.S. Tsydypov Ts.Ts., Zhigzhitov A.O. Patent Holders: Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «East Siberian State University of Technology and Management». – Application N 2011144345, appl. 1.11.2011, publ. 10.12.2012.

10. Patent RU N 2607537 B07C 5/300 Photoseparator / Savinkov M.V., Galkin E.V., Nikulin Yu.N. Patent Holders: Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «Chuvash State Agricultural Academy». – Application N 207611445, appl. 17.11.2016, publ. 10.01.2017.

11. *Tishchenko A.I.* Improving bulk grain products quality based on development and use of multi-criteria photoelectronic separators: diss. ... Cand. Sc. Engineering: 05.20.02. – Barnaul, 2000. – 304 p.

12. *Myasnyankin K.V., Ageev A. A., Tarasenko A.P.* Influence of trays type on the quality of buckwheat cleaning by photoseparator // Machinery in Agriculture. – 2014. – N 6. – P. 5–7.

13. Patent RU N 2495728 B07B 13/00. Grain sorting device / Yampilov S.S. Tsydypov Ts.Ts., Zhigzhitov A.O., Khaptaeva S.I., Budaev A.B. Patent Holders: Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «East Siberian State University of Technology and Management». – Application N 2012121083/03, appl. 22.05.2012, publ. 20.10.2013.

14. *Myasnyankin K.V.* Effect of photoseparator on buckwheat seeds quality // Innovative technologies and technical means for the agro-industrial complex. Proceedings of Voronezh State Agrarian University. – Voronezh, 2014. – P. 54–60.

15. *Vasilenko P.M.* Theory of particle motion on rough surfaces of agricultural machinery. – Kiev: Publishing House of Ukrainian Academy of Agriculture, 1960. – 283 p.

2.1.5 – СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

DOI 10.53980/24131997_2024_4_75

Е.В. Доржиева¹, канд. техн. наук, доц., e-mail: elizavetadorzhieva86@mail.ru

О.Ж. Аюрова², канд. техн. наук, доц.

Н.И. Шестаков³, канд. техн. наук, доц.

А.Б. Цыденова¹, инженер

А.А. Доржиева¹, канд. техн. наук, доц.

¹ Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,

² Бурятский государственный университет им. Д. Банзарова

г. Улан-Удэ

³ НИУ МГСУ, г. Москва

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА
НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА И ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ**

В данной статье рассматривается разработка древесно-полимерных композитов на основе полилактида и древесных отходов, предназначенных для использования в строительных материалах. Проведены исследования физико-механических и термических свойств композитов с различным соотношением компонентов. Определено, что наилучшие эксплуатационные характеристики демонстрируют композиты с содержанием 75 масс. % полилактида и 25 масс. % древесной стружки. Данный состав обеспечивает оптимальную прочность при изгибе (42 МПа), термостабильность и минимальное водопоглощение.

Ключевые слова: полилактид, древесная стружка, древесно-полимерный композит, термические свойства, физико-механические свойства.

E.V. Dorzhieva¹, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

O.Zh. Ayurova², Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

N.I. Shestakov³, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

A.B. Tsydenova¹, Engineer

A.A. Dorzhieva¹, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

¹ East Siberian State University of Technology and Management

² Buryat State University named after D. Banzarov

Ulan-Ude

³NRU MGSU, Moscow

**PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WOOD-POLYMER COMPOSITE
BASED ON POLYLACTIDE AND WOOD WASTE**

This article discusses development of wood-polymer composites based on polylactide and wood waste intended for use in building materials. It has studied physical, mechanical and thermal properties of composites with different component ratios. It is determined that the best performance characteristics are demonstrated by composites containing 75 wt. % polylactide and 25 wt. % wood chips. This composition provides optimal bending strength (42 MPa), thermal stability and minimal water absorption.

Key words: polylactide, wood chips, wood-polymer composite, thermal properties, physical and mechanical properties.

Введение

Древесина играет неопределимую роль в развитии мирового хозяйства, оказывая значительное влияние как в историческом контексте, так и в решении современных задач. Тем не менее в последние десятилетия натуральная древесина все чаще заменяется или дополняется

искусственными древесными материалами – композитами [1]. В настоящее время древесные композиты занимают одно из ведущих мест по объемам производства в мировой экономике, демонстрируя значительное разнообразие по своим свойствам и методам производства. Эта группа материалов быстро развивается как количественно, так и качественно [2–5]. Производство древесных композиционных материалов в объемных единицах уже превосходит производство стали, пластмасс и алюминия. Основными компонентами для производства древесно-полимерных композитов (далее – ДПК) служат натуральная древесина или ее отходы, а также терморезистивные или термопластичные полимеры. Важнейшими продуктами на основе древесных композитов являются фанера, древесно-стружечные и ориентированно-стружечные плиты. Ключевыми связующими компонентами в этих материалах выступают фенолформальдегидные, карбамидо- и меламиноформальдегидные синтетические смолы, обладающие высокой токсичностью [6, 7].

В настоящей работе рассматривается возможность получения ДПК на основе полилактида (далее – ПЛА) и отходов деревоперерабатывающих производств. Полилактид является биоразлагаемым, биосовместимым, термопластичным полиэфиром, мономером которого является молочная кислота [8]. В качестве сырья для производства ПЛА используются возобновляемые ресурсы, такие как кукуруза, сахарный тростник [9]. Для переработки полилактида используются стандартные технологии производства пластмасс, такие как формование, экструзия, литьевое и выдувное формование. Полимер широко используется для производства изделий с коротким сроком службы, включая пищевую упаковку, одноразовую посуду, пакеты, тару. Кроме того, ПЛА популярен в 3D-печати и медицине для производства хирургических нитей и штифтов [10].

Доступность сырья, устойчивый рост производства полилактида в мире, высокие физико-химические свойства и биоразлагаемость, а также возможность применения стандартного оборудования, делают ПЛА перспективным материалом для использования в строительных материалах [11–12]. Таким образом, получение ДПК на основе биоразлагаемого полимера – полилактида и отходов деревоперерабатывающих производств способствует решению важных экологических задач.

Целью работы являлась разработка и получение древесно-полимерных композитов на основе полилактида и древесных отходов.

Материалы и методы

Материалы. В качестве полимерной матрицы для получения древесно-полимерного композита использовали полилактид (ПЛА) марки 4032D производства КНР. ПЛА представляет собой твердые гранулы белого цвета (рис. 1 а). Основные свойства полимера приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика полилактида

Параметр	Значение
Плотность, г/см ³	1,25
Температура стеклования, °С	48
Температура текучести, °С	165
Температура плавления, °С	240
Прочность при изгибе, МПа	50

Выбор полилактида марки 4032D обусловлен его высокими физико-химическими свойствами. Высокая температура текучести полимера позволяет сохранять стабильность при переработке, что является важным фактором для достижения однородности и прочности композитного материала.

Для получения древесно-полимерного композита использовали отходы деревоперерабатывающего производства в виде древесной стружки (ДС) (рис. 1 б). Характеристика применяемого древесного наполнителя приведена в таблице 2.

Таблица 2

Основные свойства древесного наполнителя

Характеристика древесного наполнителя	Значение
Способ получения	отход со станка (станочный)
Порода дерева	сосна
Влажность, %	≤ 2
Плотность, кг/м ³	100
Длина, мм	25–30
Ширина, мм	5
Толщина, мм	0,15

Использование древесной стружки из сосны обусловлено ее доступностью и подходящими размерными характеристиками, которые обеспечивают оптимальные условия для компаундирования с ПЛА. Низкая влажность стружки предотвращает деградацию полимера и улучшает совместимость компонентов.



а



б

Рисунок 1 – Исходные материалы для приготовления древесно-полимерного композита:
а – полилактид марки 4032D; б – древесная стружка

Приготовление композитов. Древесно-полимерные композиты получали смешением исходных компонентов при различных массовых соотношениях (табл. 3).

Таблица 3

Экспериментальные составы древесно-полимерного композита

Состав	Полилактид, масс. %, %	Древесная стружка, масс. %
1	65	35
2	75	25
3	80	20

Контролируемый процесс нагрева при температуре 240 °С и перемешивания минимизирует деградацию компонентов, а применение гидравлического пресса обеспечивает однородное прессование. Используемая технология обеспечивает равномерное распределение древесных частиц в полимерной матрице, что способствует получению композитов с высокими физико-механическими свойствами.



а



б



в

Рисунок 2 – Экспериментальные образцы древесно-полимерного композита состава ПЛА/ДС:
а – 65/35 масс. %; б – 75/25 масс. %; в – 80/20 масс. %

Термогравиметрия и дифференциальная сканирующая калориметрия. Термические характеристики исходного ПЛА и композитов на его основе определяли на синхронном термическом анализаторе SDT Q600 V20.9 Build 20 (TA Instruments) в Центре коллективного пользования (МГСУ). Термографические измерения проводили в корундовых тиглях при скорости подъема температуры 5 °/мин в воздушной атмосфере. Навеска образцов варьировалась от 7 до 30 мг.

Определение предела прочности и модуля упругости при статическом изгибе. Исследование на прочность при изгибе проводили согласно ГОСТ 4648-2014 на универсальной машине Instron 1000 HDX. Испытуемый образец подвергался изгибу с постоянной скоростью, равной 1 мм/мин, в середине между опорами до разрушения. Образцы имели длину 40 мм, ширину 4 мм и толщину 0,5 мм. Все результаты представляют собой средние значения пяти измерений.

Определение водопоглощения. Водопоглощение полученных древесно-полимерных композитов осуществляли в соответствии с ГОСТ 4650-2014. Сначала образцы сушили при температуре 50 °С в течение 24 ч в воздушной печи. Далее образцы взвешивали на весах марки CAS CBL-220H высокой точности (точность, г: 0,001) и погружали в стаканы с дистиллированной водой. Через заданные промежутки времени образцы вынимали из воды, взвешивали и снова помещали в ванну. Эту процедуру повторяли до тех пор, пока не достигалось насыщение измеряемой массы. Расчет водопоглощения проводили по формуле:

$$Wm = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\%,$$

где m_1 – масса образца до погружения в воду (г); m_2 – масса образца после погружения в воду.

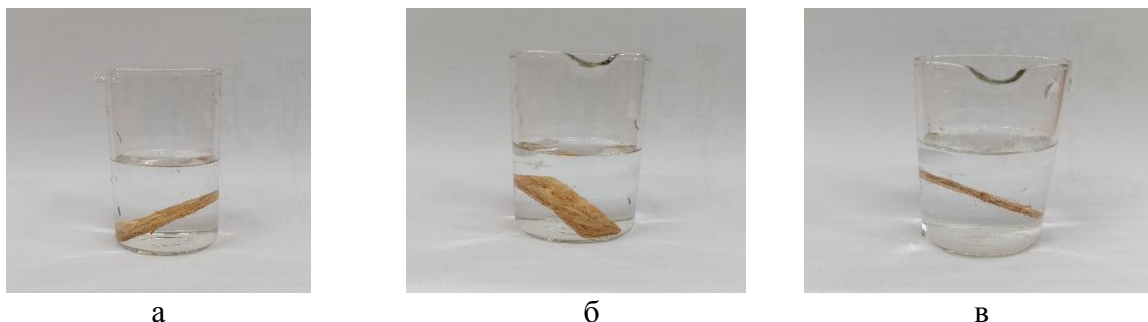


Рисунок 3 – Определение водопоглощения древесно-полимерного композита состава ПЛА/ДС (древесная стружка): а – 65/35 масс. %; б – 75/25 масс. %; в – 80/20 масс. %

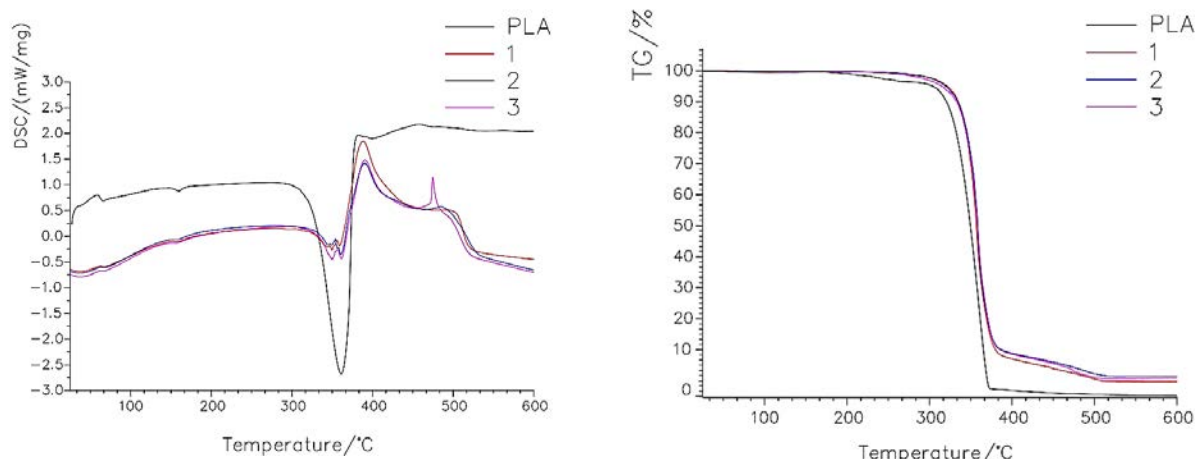
Оптическая микроскопия. Микрофотографии древесно-полимерных композитов получали с помощью микроскопа «Микмед WiFi 2000X 5.0».

Результаты и обсуждение

Параметры переработки исходного ПЛА были выбраны с использованием методов термогравиметрии (ТГ) и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК). Исследование термических характеристик полученных материалов позволило прогнозировать температурные диапазоны при их эксплуатации и соответственно области практического применения [13].

На рисунке 4 показаны ТГ и ДСК для исходного ПЛА и древесно-полимерных композитов исследуемых составов 1–3, полученные путем сканирования нагрева. Термограммы ДПК (рис. 4 б) отличались от термограммы исходного ПЛА. Потеря массы полученных композитов наблюдалась в интервалах температур 270–350 и 360–530 °С, тогда как основная потеря массы полимерной матрицы происходила от 290 до 370 °С. На кривых ДСК композитов было зафиксировано два экзотермических пика в интервале температур 200–600 °С. Первый

экзоэффект наблюдался в температурном интервале ~200–360 °С и был обусловлен распадом гемицеллюлозы и целлюлозы, в результате чего образовывались газообразные продукты термодеструкции. Второй экзоэффект в пределах 360–600 °С был вызван окислительной деструкцией продуктов разложения и лигнина. Подобные результаты по термоокислительной деструкции ДПК были показаны в работах [14–15].



а – Результаты термогравиметрического анализа (ТГ)

б – Результаты дифференциально-сканирующей калориметрии ДСК

Рисунок 4 – ТГ и ДСК полилактида и древесно-полимерного композита состава ПЛА/ДС: 1 – 65/35 масс. %; 2 – 75/25 масс. %; 3 – 80/20 масс. %

Анализ термических свойств показал, что введение наполнителя приводило к незначительному изменению термических свойств. При наполнении полимерной матрицы наблюдалось повышение термостойкости на ~4 %, а также смещение $T_{пл}$ и $T_{ст}$ в высокотемпературную область. Установлено, что полимерный композит состава № 2 характеризуется лучшими показателями. Эти результаты подтверждают, что сочетание армирования древесной стружкой и кристаллизации ПЛА в матрице способствует повышению термостойкости полимерного композита. В работе [2] также сообщается, что добавление натурального волокна в полимерную матрицу улучшает термическую стабильность композитов. Возможно, присутствие ДС способствует кристаллизации ПЛА. Полученные результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4

Термические свойства полилактида и древесно-полимерных композитов на его основе

Образец	Температура потери массы образца τ_{10} при T , °С	Температура плавления $T_{пл}$, °С	Температура стеклования $T_{ст}$, °С
Исходный ПЛА	320,50	149,69	58,70
1	334,70	152,08	62,66
2	334,14	152,512	63,64
3	332,98	151,54	62,93

Известен факт, что механические свойства древесно-полимерных композитов зависят не только от химического состава и количества наполнителя, но и от размера и формы его частиц [16]. Для оценки эффекта армирования древесной стружкой полимерной матрицы ПЛА были изучены механические свойства композита (рис. 5).

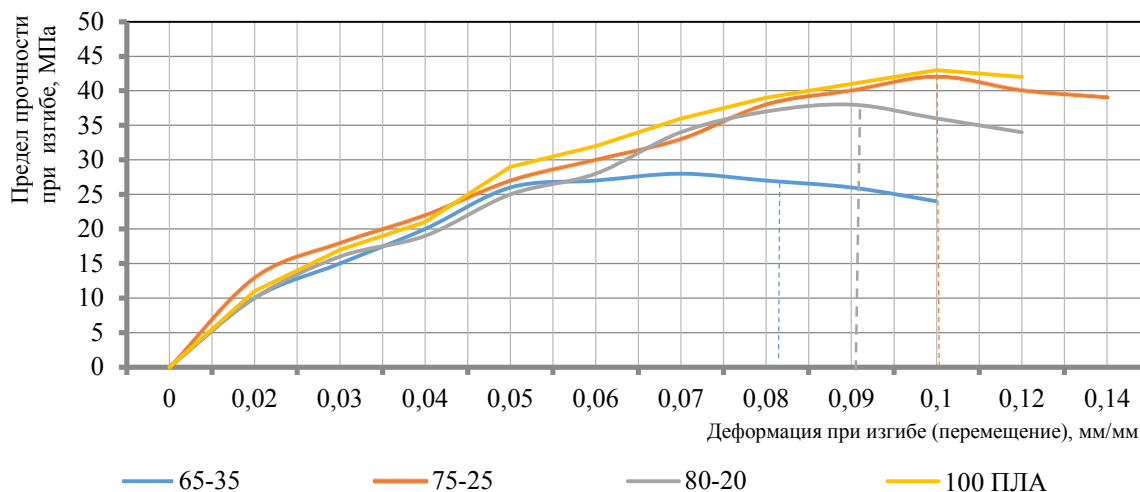


Рисунок 5 – Определение предела прочности и относительного удлинения при изгибе древесно-полимерных композитов состава ПЛА/ДС

Результаты анализа обработки экспериментальных данных показали, что предел прочности при изгибе образца на основе исходного ПЛА составило 43 МПа. Введение 25 масс. % древесного наполнителя незначительно снижает этот показатель до 41–42 МПа. Дальнейшее увеличение количества наполнителя до 35 масс. % приводит к существенному снижению прочности композитного материала. При содержании ДС до 20 масс. % наблюдается уменьшение показателя предела прочности при изгибе на 12 %. Следует отметить, что наполнение ПЛА древесной стружкой (25 масс. %) приводит к увеличению относительного удлинения в сравнении с исходным полилактидом на 16–17 %. Все серии образцов полученных древесно-полимерных композитов на основе ПЛА (табл. 5) сохраняли достаточно высокие показатели прочности при изгибе от 27 до 42 МПа при требуемом значении не менее 25 МПа для древесно-полимерных композитов.

Таблица 5

Физико-механические свойства древесно-полимерных композитов на основе ПЛА

Со- став	Соотношение компонентов		Плотность, кг/м ³	Водопоглощение по массе, %	Предел прочности на изгиб, МПа
	древесная стружка, масс. %	ПЛА масс. %			
1	35	65	700	4,99	27,0
2	25	75	710	3,90	42,0
3	20	80	720	4,97	38,0

Из таблицы 5 видно, что плотность материала возрастала с увеличением содержания ПЛА. Образцы состава ПЛА/ДС (75/25 масс. %) обладали очень малым водопоглощением, максимальными показателями предела прочности и относительного удлинения при изгибе, превосходя по этим характеристикам другие исследованные образцы.

Методом оптической микроскопии было показано неоднородное распределение древесных волокон в композите состава 65/35 масс. % (рис. 6 а). Полимер недостаточно заполнял пространство между волокнами, что приводило к наличию пустот и, следовательно, ограниченной адгезии между компонентами. Увеличение массовой доли полимера до 75 % обеспечивало оптимальное распределение и связывание древесных волокон с образованием прочной и однородной структуры (рис. 6 б), что способствовало улучшению механических свойств композита.

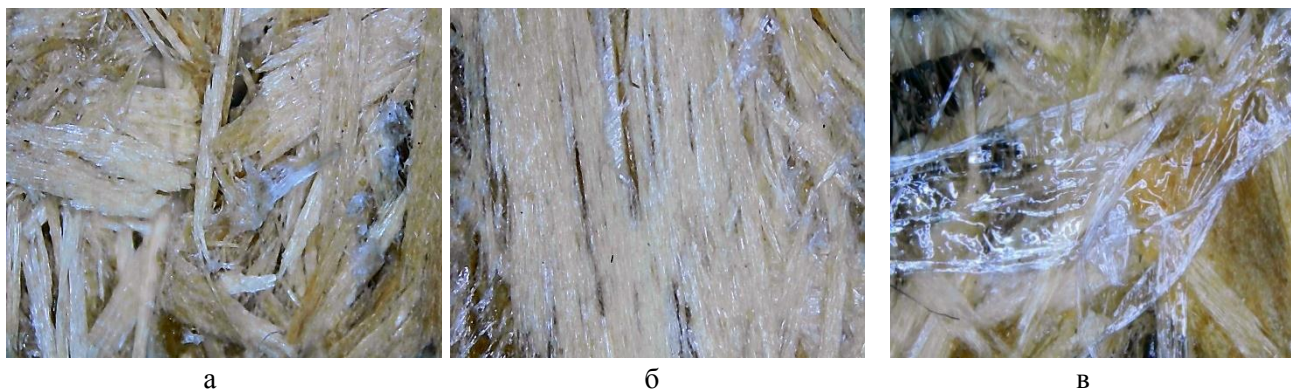


Рисунок 6 – Микрофотографии древесно-полимерных композитов состава ПЛА/ДС:
а – 65/35 масс. %; б – 75/25 масс. %; в – 80/20 масс. %

Избыточное количество полимера в составе композита приводило к значительному уменьшению количества древесных волокон и, как следствие, к снижению их структурной роли, что вело к изменению физико-механических свойств.

Заключение

Получены древесно-полимерные композиты на основе полилактида и древесных отходов. Установлено, что наилучшие эксплуатационные характеристики демонстрируют композиты с содержанием 75 масс. % полилактида и 25 масс. % древесной стружки. Данный состав обеспечивает достаточно высокие показатели прочности при изгибе (42 МПа), термостойкости (334 °С). Относительное удлинение при изгибе увеличивается на 16–17 % в сравнении с исходным полимером. Полученный композит характеризуется низким водопоглощением, что важно для долговечности строительных материалов.

Библиография

1. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Очиров Б.О. Опилкобетон, полученный с применением древесных отходов Республики Бурятия и ультрадисперсных добавок // Вестник ВСГУТУ. – 2021. – № 2 (81). – С. 69–74. – EDN JAZBXZ. Урханова Л.А., Доржиева Е.В., Заяханов М.Е. и др. Теплоизоляционный материал на основе торфов Республики Бурятия // Вестник ВСГУТУ. – 2020. – № 2 (77). – С. 59–65. – EDN WTYBMN.
2. Mohammad Z.R. Khan, Sunil Kumar Srivastava, M.K. Gupta. A state-of-the-art review on particulate wood polymer composites: Processing, properties and applications // Polymer Testing. – 2020. – Vol. 89. – P. 106721. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106721>
3. Wei Miao, Wenxi Cheng, Weiqiang Song. The influence of poly (maleic anhydride-co- vinyl acetate) on polylactide/wood flour/calcium carbonate composites // Polymer Testing. – 2023. – Vol. 120. – P. 107945. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.107945>
4. Slomkowski S., Penczek S., Duda A. Polylactides-an overview // Polym. Adv. Technol. – 2014. – N 25 (5). – P. 436-447.
5. Bekhta P. Recent Developments in Eco-Friendly Wood-Based Composites II. Polymers 2023. 15, 1941. <https://doi.org/10.3390/polym15081941>
6. Tao Qiang, Demei Yu, Zhen Han Life cycle assessment on polylactide-based wood plastic composites toughened with polyhydroxyalkanoates // Journal of Cleaner Production. – 2014.
7. Suprakas Sinha Ray, Ritima Banerjee. 5 – Natural fiber-reinforced polylactide composites, Editor(s): Suprakas Sinha Ray, Ritima Banerjee, Sustainable Polylactide-Based Composites, Elsevier. 2023. P. 131–163. – URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99640-2.00013-1>
8. Chin-San Wu. Polylactide-based renewable composites from natural products residues by encapsulated film bag: Characterization and biodegradability // Carbohydrate Polymers. – 2012. – Vol. 90, Issue 1. – P. 583–591. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.05.081>

9. *Richard Gattin, Alain Copinet, Céline Bertrand et al.* Biodegradation study of a starch and poly(lactic acid) co-extruded material in liquid, composting and inert mineral media // *International Biodeterioration & Biodegradation*. – 2002. – Vol. 50, Issue 1. – P. 25–31. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(02\)00039-2](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(02)00039-2)
10. *Bhuvanesh Gupta, Nilesh Revagade, Jöns Hilborn.* Poly(lactic acid) fiber: An overview, *Progress in Polymer Science*. – 2007. – Vol. 32, Issue 4. – P. 455–482. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.01.005>
11. *Iovino R., Zullo R., Rao M.A. et al.* Biodegradation of poly(lactic acid)/starch/coir biocomposites under controlled composting conditions // *Polymer Degradation and Stability*. – 2008. – Vol. 93, Issue 1. – P. 147–157. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2007.10.011>
12. *Hajar Faraj, Cyrille Sollogoub, Alain Guinault et al.* A comparative study of the thermo-mechanical properties of polylactide/cellulose nanocrystal nanocomposites obtained by two surface compatibilization strategies // *Materials Today Communications*. – 2021. – Vol. 29. – P. 102907. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102907>
13. *Yunpeng Li, Haoran Shen, Shaojuan Wang et al.* Structure evolution of amorphous poly(D-lactic acid) on highly oriented poly(L-lactic acid) film during annealing // *Polymer*. – 2023. – Vol. 280. – P. 126037. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126037>
14. *Kaewkan Wasanasuk, Kohji Tashiro.* Crystal structure and disorder in Poly(L-lactic acid) δ form (α' form) and the phase transition mechanism to the ordered α form // *Polymer*. – 2011. – Vol. 52, Issue 26. – P. 6097–6109. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386111008949>
15. *Ruoxing Chang, Yongfeng Huang, Guorong Shan et al.* Alternating poly (lactic acid) /poly (ethylene-co-butylene) supramolecular multiblock copolymers with tunable shape memory and self-healing properties // *Polymer Chemistry*. – 2015. – Vol. 6, Issue 32. – P. 5899–5910. – URL: <https://doi.org/10.1039/c5py00742a>

Bibliography

1. *Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Ochirov B.O.* Sawdust concrete obtained with the use of wood waste from the Republic of Buryatia and ultrafine additives // *ESSUTM Bulletin*. – 2021. – N 2 (81). – P. 69–75.
- Urkhanova L.A., Dorzhieva E.V., Zayakhanov M.E. et al.* Heat-insulating material based on peats of the Republic of Buryatia // *ESSUTM Bulletin*. – 2020. – N 2 (77). – P. 59–65.
2. *Khan M. Z.R., Srivastava S. K., Gupta M.K.* A state-of-the-art review on particulate wood polymer composites: Processing, properties and applications // *Polymer Testing*. – 2020. – Vol. 89. – P. 106721. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106721>
3. *Wei Miao, Wenxi Cheng, Weiqiang Song.* The influence of poly (maleic anhydride-co- vinyl acetate) on polylactide/wood flour/calcium carbonate composites // *Polymer Testing*. – 2023. – Vol. 120. – P. 107945. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.107945>
4. *Slomkowski S., Penczek S., Duda. A.* Polylactides-an overview // *Polymers for Advanced Technologies*. – 2014. – N 25 (5) – P. 436–447.
5. *Bekhta P.* Recent developments in eco-friendly wood-based composites II // *Polymers*. – 2023. – N 15. – P. 1941. – URL: <https://doi.org/10.3390/polym15081941>.
6. *Tao Qiang, Demei Yu, Anjiang Zhang et al.* Life cycle assessment on polylactide-based wood plastic composites toughened with polyhydroxyalkanoates // *Journal of Cleaner Production*. – 2014.
7. *Ray S.S., Banerjee R.* 5 – Natural fiber-reinforced polylactide composites // *Sustainable Polylactide-Based Composites*, Elsevier. – 2023. – P. 131–163. – URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99640-2.00013-1>
8. *Wu Chin-San.* Polylactide-based renewable composites from natural products residues by encapsulated film bag: Characterization and biodegradability // *Carbohydrate Polymers*. – 2012. – Vol. 90, Issue 1. – P. 583–591. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.05.081>
9. *Gattin R., Copinet A., Bertrand C. et al.* Biodegradation study of a starch and poly(lactic acid) co-extruded material in liquid, composting and inert mineral media // *International Biodeterioration & Biodegradation*. – 2002. – Vol. 50, Issue 1. – P. 25–31. – URL: [https://doi.org/10.1016/S0964-8305\(02\)00039-2](https://doi.org/10.1016/S0964-8305(02)00039-2)

10. *Gupta B., Revagade N., Hilborn J.* Poly(lactic acid) fiber: An overview // *Progress in Polymer Science.* – 2007. – Vol. 32. Issue 4. – P. 455–482. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.01.005>
11. *Iovino R., Zullo R., Rao M.A. et al.* Biodegradation of poly (lactic acid) / starch / coir biocomposites under controlled composting conditions // *Polymer Degradation and Stability.* – 2008. – Vol. 93, Issue 1. – P. 147–157. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.10.011>
12. *Faraj H., Sollogoub C., Guinault A. et al.* A comparative study of the thermo-mechanical properties of polylactide/cellulose nanocrystal nanocomposites obtained by two surface compatibilization strategies // *Materials Today Communications.* – 2021. – Vol. 29. – P. 102907. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.102907>
13. *Yunpeng Li, Haoran Shen, Shaojuan Wang et al.* Structure evolution of amorphous poly(d-lactic acid) on highly oriented poly(l-lactic acid) film during annealing // *Polymer.* – 2023. – Vol. 280. – P. 126037. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126037>
14. *Wasanasuk K., Tashiro K.* Crystal structure and disorder in Poly(l-lactic acid) δ form (α' form) and the phase transition mechanism to the ordered α form // *Polymer.* – 2011. – Vol. 52, Issue 26. – P. 6097–6109. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386111008949>
15. *Ruoxing Chang, Yongfeng Huang, Guorong Shan et al.* Alternating poly(lactic acid)/poly(ethylene-co-butylene) supramolecular multiblock copolymers with tunable shape memory and self-healing properties // Electronic supplementary information (ESI) available: Experimental procedure of TEM analysis, physical state, GPC, DSC, SAXS, tensile stress–strain, and DMA curves, TEM images, shape recovery and self-healing ability of SMPs and their precursors // *Polymer Chemistry.* – 2015. – Vol. 6, Issue 32. – P. 5899–5910. – URL: <https://doi.org/10.1039/c5py00742a>

DOI 10.53980/24131997_2024_4_84

С.А. Иванов, канд. техн. наук, доц., e-mail: isa.ad@kuzstu.ru
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет
им. Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово

УДК 691.162

РЕЗИНОАСФАЛЬТОБЕТОН НА ОСНОВЕ ПРОДУКТА УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Асфальтобетонные смеси и, как следствие, асфальтобетон применяются чаще всего для устройства верхних слоев основания и слоев покрытия при строительстве автомобильных дорог. Постоянно возрастающие осевые нагрузки и увеличенная интенсивность движения требуют рассмотрения новых материалов для увеличения межремонтных сроков службы автомобильных дорог. Постоянно растущие объемы автомобильного транспорта и, как следствие, увеличение объемов автомобильных покрышек требует поиска новых путей их утилизации, поскольку их накопление влечет к увеличению загрязняющих веществ.

В данной статье рассматривается возможность применения асфальтобетонных смесей на основе модифицированного битума резиновой крошкой, полученной путем переработки изношенных автомобильных шин и других резинотехнических изделий. Приведены характеристики используемых материалов, составляющих асфальтобетонную смесь, а также опыт эксплуатации асфальтобетонных покрытий на основе резиновой крошки.

Ключевые слова: резиновая крошка, резиноасфальтобетон, битум, вяжущее, долговечность.

S.A. Ivanov, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo

RUBBER-ASPHALT CONCRETE BASED ON RECYCLED INDUSTRIAL WASTE

In world practice, asphalt concrete mixtures are most widely used for the construction of road surfaces. Constantly increasing axle loads and increased traffic intensity require the consideration of new materials to prolong the service life of public roads between repairs. Constantly growing number of road transport and consequently car tires number require new ways of their disposal, since their accumulation leads to increasing environment pollution.

This article discusses possibility of using asphalt concrete mixtures based on modified bitumen with crumb rubber obtained by processing worn-out car tires and other rubber products. It gives characteristics of the materials making up the asphalt concrete mixture, as well as operational experience with asphalt concrete pavements based on crumb rubber.

Key words: crumb rubber, rubber- asphalt concrete, bitumen, binder, durability.

Введение

Асфальтобетонные смеси стали неотъемлемой частью современного дорожного строительства. Их популярность объясняется множеством факторов, таких как ремонтпригодность, долговечность, относительная экономичность, простота укладки и т. д. Асфальтобетонные покрытия также обладают высокой скоростью укладки. Это позволяет значительно сократить время на строительство и ремонт дорог, что, в свою очередь, минимизирует неудобства для водителей и пешеходов. Легкость ремонта – еще одно важное преимущество: в случае повреждений такие покрытия можно быстро восстановить, что снижает затраты на содержание дорог.

Совершенствованию асфальтобетонных покрытий посвящены работы многих авторов и исследовательских групп. В их исследованиях рассматриваются различные аспекты, такие

как состав смесей, технологии укладки, методы контроля качества и долговечности. Эти научные разработки направлены на улучшение эксплуатационных характеристик асфальтобетонных покрытий и их адаптацию к различным условиям эксплуатации [1–11].

Помимо прочего, распространенные асфальтобетонные покрытия автомобильных дорог имеют ряд недостатков. Основные недостатки сводятся к следующему: высокая вероятность образования трещин (в том числе и отраженных), ограничение пропускной способности высоких осевых нагрузок в летний период, низкая сопротивляемость статических деформациям, требовательность к исходным компонентам асфальтобетонных смесей.

Покрытия, устроенные из монолитного цементобетона, могут устранить недостатки применительно к асфальтобетонным смесям. Однако они имеют другие отличительные особенности, такие как: высокая стоимость, низкая ремонтпригодность, длительные перерывы для набора прочности бетона, низкое удобство движения, проявляющееся в необходимости создания деформационных швов (расширения-сжатия, коробления, технологических швов и пр.).

Наиболее распространенные периоды расчетного срока службы нежестких дорожных одежд делятся 10–15 лет [12–14], однако реальный период из-за постоянно возрастающих осевых нагрузок и интенсивности движения грузового транспорта составляет 5–7 лет. Это явление вызывает серьезную озабоченность, так как не только сокращает срок эксплуатации дорог, но и приводит к увеличению затрат на их реконструкцию и ремонт, а также к снижению безопасности движения.

Причины преждевременного износа асфальтобетонных покрытий многообразны. В первую очередь следует отметить неблагоприятные климатические условия, характерные для многих регионов России. Чередование заморозков и оттепелей, сильные осадки, изменение температур и интенсивные солнечные лучи оказывают разрушительное воздействие на асфальтобетон, способствуя его растрескиванию, выветриванию и деформации.

От долговечности асфальтобетонных покрытий также зависит сокращение затрат на их ремонт и реконструкцию. Частые работы по восстановлению дорожного полотна требуют значительных финансовых ресурсов, а также временных затрат, что негативно сказывается на транспортных потоках. Поэтому разработка новых технологий и материалов, которые могут увеличить срок службы дорожных покрытий, становится актуальной задачей для дорожных служб и исследовательских организаций.

Федеральное дорожное агентство России разработало и внедрило документацию по внедрению инновационных асфальтобетонных смесей по системе Supergravel. Важным элементом этой системы является выбор битумного вяжущего, которое должно соответствовать заданным параметрам.

Для Кузбасса, например, согласно требованиям системы Supergravel, интервал пластичности битумного вяжущего должен находиться в пределах 105–110 °С. Это значение гораздо выше, чем у большинства битумов марки БНД 70/100, которые производятся в России и имеют интервал пластичности в диапазоне 65–70 °С. Такие различия подчеркивают необходимость модификации существующих битумов, чтобы соответствовать новым требованиям, иначе внедрение системы Supergravel окажется неэффективным.

Внедрение системы Supergravel также может способствовать развитию отечественной науки и технологий в области дорожного строительства. Это создаст новые рабочие места и даст толчок для исследований в области материаловедения. Таким образом, переход на более современные технологии проектирования асфальтобетонных смесей не только улучшит качество дорог, но и окажет положительное влияние на экономику страны. Важно, чтобы все заинтересованные стороны, включая государственные органы, научные учреждения и производственные компании, активно сотрудничали для успешного внедрения этой системы.

В целях реализации требований ТР ТС 014/2011 решением Коллегии Евразийской экономической комиссии от 12.09.2012 № 159 утверждены Перечень стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований ТР ТС 014/2011, и Перечень стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и

измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения требований ТР ТС 014/2011 и осуществления оценки (подтверждения) соответствия продукции.

В связи с окончанием переходного периода, установленного решением Комиссии Таможенного союза от 18.10.2011 № 827, с 01.09.2016 не допускается применение дорожно-строительных материалов и изделий, не соответствующих требованиям ТР ТС 014/2011. Учитывая изложенное, Росавтодор информирует, что в настоящее время в Российской Федерации действуют только две системы проектирования асфальтобетонных смесей, гармонизированные с межгосударственными стандартами, включенными в Перечни стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований ТР ТС 014/2011, а именно:

– комплекс национальных стандартов серии 58406 (ГОСТ Р 58406.1-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Смесей щебеночно-мастичные асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия», ГОСТ Р 58406.2-2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Смесей горячие асфальтобетонные и асфальтобетон. Технические условия» и т. д.);

– комплекс национальных стандартов серии 58401 (ГОСТ Р 58401.1-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. Технические требования», ГОСТ Р 58401.2-2019 «Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Система объемно-функционального проектирования. Технические требования» и т. д.).

Кроме того, в соответствии с Приказом Росстандарта от 24.03.2015 № 157-ст применение ГОСТ 9128-2009 на территории Российской Федерации восстановлено с 31.03.2015, а решение о применении ГОСТ 9128 устанавливается в государственных контрактах (договорах), в иных случаях решение принимается самостоятельно заинтересованными организациями.

Помимо прочего, СП 82.13330.2016 «Благоустройство территорий» нормирует использование ГОСТ 9128-2013 для применения при строительстве, ремонте, капитальном ремонте как дворовых территорий, так и для площадок благоустройства.

Таким образом, при выполнении работ по проектированию, строительству, реконструкции, при капитальном ремонте, ремонте и содержании автомобильных дорог и искусственных дорожных сооружений на них, в том числе при формировании соответствующих технических заданий, в части применения асфальтобетонных смесей следует руководствоваться требованиями вышеуказанных комплексов национальных стандартов, соответствующих межгосударственным стандартам, включенными в Перечни стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований ТР ТС 014/2011.

Для успешного внедрения полимерасфальтобетонов и применения системы проектирования асфальтобетонных смесей Supergravel необходимо улучшение асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог, чего невозможно достичь без повышения качества битумных вяжущих материалов через их модификацию. Современные технологии утилизации автомобильных шин играют важную роль в этом процессе, так как шины представляют собой значительный источник вторичных материалов, которые могут быть использованы в строительстве и дорожном ремонте.

Существует несколько технологий утилизации [15, 16].

1. Сжигание шин. Этот способ используется для получения энергии, однако он имеет свои недостатки. Пиролиз в условиях низких температур позволяет получить легкий дистиллят и твердое топливо, схожее по свойствам с древесным углем. Тем не менее сжигание изношенных шин не является экологически чистым и энергетически эффективным методом. Для производства одной покрышки требуется энергия, эквивалентная сжиганию 8 л нефти, что делает этот способ нецелесообразным с точки зрения энергетической эффективности. В связи с этим акцент следует делать на нетермических методах вторичного использования.

2. Переработка в резиновую крошку и порошки. Этот метод позволяет получить высококачественные материалы для создания полимерных смесей и строительных материалов. Резиновая крошка может использоваться для улучшения свойств асфальтобетонных смесей, таких как прочность и устойчивость к деформациям, что делает дороги более долговечными.

3. Получение регенерата. Этот процесс включает переработку шин в регенерированную резину, которая может использоваться для производства травмобезопасных покрытий детских и спортивных площадок, а также модифицирования битумных вяжущих [17, 18, 24, 25].

Применение резинированных асфальтобетонов в слоях дорожных покрытий имеет множество значительных преимуществ, которые способствуют увеличению межремонтных сроков и общей долговечности дорожной инфраструктуры.

1. Устойчивость к трещинообразованию.

Модифицированные резиновой крошкой битумы обладают высокой деформативностью и эластичностью. Это позволяет им лучше противостоять температурным колебаниям, усталостным нагрузкам и отраженному трещинообразованию. В результате дорожные покрытия становятся более устойчивыми к повреждениям, что значительно увеличивает срок их службы.

2. Сопротивление окислительному старению.

Одним из ключевых факторов, способствующих долговечности покрытий, является наличие антиоксидантов в шинной резине, используемой для модификации битума. Эти антиоксиданты помогают предотвратить окисление, что, в свою очередь, уменьшает риск разрушения покрытия под воздействием окружающей среды.

3. Сопротивление колееобразованию.

Высокая вязкость битума, модифицированного резиновой крошкой, при повышенных температурах способствует снижению колееобразования. Это особенно важно для дорог с интенсивным движением, где такое явление может привести к ухудшению условий эксплуатации и безопасности.

4. Снижение уровня шума.

Использование резины в асфальтобетонах также позволяет снизить уровень шума, создаваемого автомобилями на дороге. Это достигается за счет улучшения структуры покрытия, что приводит к более мягкому и тихому движению транспортных средств.

5. Экологические преимущества.

В последние десятилетия в России и мире наблюдается активное внедрение инновационных технологий в дорожное строительство. Одной из таких технологий является использование резиновой крошки для модификации асфальтобетонов. Это направление не только способствует улучшению качества дорожного покрытия, но и решает проблемы утилизации отходов резинотехнической продукции.

В Российской Федерации также проводятся работы по модифицированию битума нефтяного различными отходами резинотехнической промышленности. Наибольшее распространение получили работы, выполнимые «БИТРЭК», «УНИРЕМ» и «ЭРАКРИН» [19, 20].

В мировой практике выделяются две основные технологии модификации битумов резиновой крошкой:

1. Метод Asphalt Rubber. Этот метод предполагает использование относительно низких температур (160–200 °С) в процессе смешивания [21–23]. Он не требует специального оборудования, что делает его доступным для широкого применения. Однако, несмотря на простоту, данный метод имеет свои ограничения, связанные с долговечностью получаемого покрытия.

2. Метод Terminal Blended. В отличие от первого этот метод использует повышенные температуры (200–260 °С) и специальное смесительное оборудование. Это позволяет достичь более качественного взаимодействия между битумом и резиновой крошкой, тем самым улучшая характеристики асфальтобетонной смеси.

Существует два основных способа введения резиновых отходов в битумное вяжущее.

Сухой способ. В этом случае резиновая крошка вводится непосредственно в асфальтобетонную смесь. Этот метод является наиболее простым и дешевым, однако он имеет серьезные недостатки. Отмечается, что резиновая крошка, введенная подобным образом, с течением времени увеличивается в объеме (происходит ее набухание), что ведет к разрушению минеральной части асфальтобетонного покрытия.

Мокрый способ. Этот метод включает добавление резиновой крошки в битум, что позволяет достичь более эффективного взаимодействия компонентов. В процессе применения мокрого способа резина разлагается и девулканизируется, что способствует улучшению свойств асфальтобетонной смеси. Однако для этого требуется использование специальных пластификаторов и дополнительного оборудования, что увеличивает затраты на производство.

Использование резиновой крошки для модификации асфальтобетонов представляет собой перспективное направление, способствующее улучшению качества дорожных покрытий и решению экологических проблем.

В связи с этим **целью работы** является изучение процесса модификации битума резиновой крошкой при температурах, превышающих предельные для старения органического вяжущего, путем разделения процесса получения модификатора на две стадии. На первой стадии – получение концентрированной суспензии резинобитумного композита, а затем – получение резинированных асфальтобетонных смесей на его основе.

Материалы и методы исследования

Из-за постоянно возрастающих транспортных нагрузок и повышения интенсивности движения была введена система объемно-функционального проектирования дорожных одежд. Данная техника включает в себя индивидуальный подбор вяжущих под каждую асфальтобетонную для конкретной дорожно-климатической зоны.

Достичь высоких физико-механических показателей с использованием чистого битума стало невозможно. Необходимы методы по повышению его характеристик. В данной работе модифицирование битума резиновой крошкой выполнено путем применения двухстадийного технологического процесса производства, разработанного автором статьи. Суть метода заключается в получении на первой стадии резинобитумного композита (суспензии), а на второй – битумного вяжущего. Отличие данного метода от других заключается в минимизировании исходных компонентов и, как следствие, снижении себестоимости, а также снижении этапов по старению органического вяжущего. Патент № RU 2016118144 по данному методу получен 13.11.2017.

В итоговом варианте битум, модифицированный резиновой крошкой, состоит из битума марки БНД 70/100, масла-пластификатора ПН-6Ш и резиновой крошки, полученной путем переработки изношенных автомобильных шин.

Отличительной особенностью модифицирования битума резиновой крошкой является тот факт, что основной модификатор (резиновая крошка) является продуктом отходов промышленности. Ведь постоянно возрастающая нагрузка на экологическую обстановку Кузбасса увеличивается пропорционально вышедшим из строя покрышкам от крупнотоннажного транспорта, занятого на добыче каменного угля. Кроме того, появление новых заводов обеспечивает необходимыми производственными мощностями сырьевую базу по производству битума, модифицированного резиновой крошкой.

Стоит отметить, что модифицированное органическое вяжущее само по себе не является продуктом, который может заинтересовать потребителя, который, в свою очередь, сможет в достаточном количестве утилизировать произведенную резиновую крошку. Поскольку не важно, в каком виде будет храниться резина (в виде изношенных шин или измельченной мелкодисперсной крошки), она одинаково будет влиять на экологическую обстановку, разлагаясь под действием погодно-климатических факторов.

Основной материал, который может утилизировать большую часть отходов резинотехнической промышленности – автомобильные дороги. В асфальтобетонных смесях, состоящих из щебня, песка и минерального порошка, находится от 4 до 6 % органического вяжущего, являющегося связующим звеном всей минеральной части асфальтобетона. От связующего материала зависят значимые физико-механические характеристики, адгезионное и когезионное сцепление составляющих минеральных материалов и, как следствие, прочный каркас всей конструкции.

Рассматриваемый модификатор битума в виде резинового порошка, имеет ряд преимуществ перед другими средствами улучшения физико-механических/химических свойств органического вяжущего:

- во-первых, бóльшая эластичность по отношению к исходному битуму;
- во-вторых, увеличение высоко- и низкотемпературных свойств вяжущего, а как следствие увеличение интервала пластичности;
- в-третьих, стойкость к пластическим деформациям от высоких осевых нагрузок;
- в-четвертых, на фоне улучшения свойств вяжущего немаловажным фактором будет являться улучшение экологической обстановки каждого субъекта РФ путем утилизации продукта отходов промышленности.

В данной работе рассмотрен инновационный подход к оптимизации по улучшению физико-механических свойств самого вяжущего и асфальтобетона на его основе, а также снижение стоимостных затрат относительно других технологий, требующих более сложных составляющих компонентов и сложного метода его производства.

В качестве вяжущего был принят битум БНД 70/100 по ГОСТ 33133-2014 [13] производства Омского НПЗ.

В качестве масла-пластификатора применяется масло ПН-6Ш. Одним из ключевых преимуществ ПН-6Ш является его термическая устойчивость. Это свойство позволяет ему сохранять свои характеристики при высоких температурах, что критически важно в условиях эксплуатации шин, где температура может значительно повышаться. Кроме того, по воздействию на организм человека это вещество классифицируется как малоопасное. Это делает его более безопасным в использовании по сравнению с другими химическими веществами, которые могут вызывать аллергические реакции или иметь токсичный эффект.

Минеральное масло ПН-6Ш также отличается отсутствием резкого неприятного запаха, что является дополнительным преимуществом при его использовании в производственных условиях. Это делает процесс работы с ним более комфортным для работников, что важно с точки зрения охраны труда и здоровья.

Резиновая крошка, универсальный продукт отходов промышленности получаемый, главным образом, из изношенных автомобильных шин и отходов резинотехнической промышленности. Постоянно увеличивающееся количество автомобильного транспорта и повышение объемов угледобычи (износ крупнотоннажных покрышек) влечет за собой поиск путей утилизации подобного рода отходов, которые значительно влияют на экологическую обстановку не только регионов Российской Федерации, но и мира в целом.

В настоящее время по всей стране функционирует около 30 заводов по переработке автомобильных шин, вышедших из эксплуатации. Размер выпускаемого материала варьируется от 0,1 до 5 мм. Фракции подобного типа используются в различных отраслях промышленности. Например, фракция от 0,1 до 1 мм используется для модифицирования органических вяжущих, 1–3 мм – для устройства монолитных слоев верхнего слоя покрытий детских и спортивных площадок, а также для производства рулонных покрытий 3–5 мм – применяется для производства травмобезопасных плит.

В данной работе рассматривалось применение резины Новокузнецкого завода по переработке изношенных автомобильных шин фракции 0–1 мм, полученной главным образом из изношенных шин машин и механизмов горнодобывающих мероприятий. Резиновая крошка соответствует требованиям ГОСТ Р 55419-2013.

В качестве минерального материала был принят щебень изверженной горной породы фракции 5–20 мм.

Для получения асфальтового вяжущего асфальтобетонной смеси использовался минеральный порошок ОАО «Кемеровоспецстрой» марки МП-1.

Принятый минеральный порошок по зерновому составу и физическим свойствам соответствует требованиям ГОСТ Р 52129-2003 и может использоваться для получения горячего мелкозернистого плотного асфальтобетона типа А марки I.

Результаты исследования

В процессе подбора состава асфальтобетонной смеси был выбран метод, предложенный профессором Н.Н. Ивановым, основывающийся на предельных кривых плотных смесей, разработанных в институте СоюздорНИИ. Этот метод стал наиболее популярным и широко применяемым в практике, что обусловлено его эффективностью и надежностью. Модифицированные битумы, в частности те, которые содержат резиновую крошку, находят свое применение в основном при создании верхних слоев дорожных покрытий. Это связано с их улучшенными эксплуатационными характеристиками, такими как стойкость к деформациям и трещинообразованию, что особенно актуально для регионов с агрессивными климатическими условиями.

Для того чтобы адекватно оценить эффективность асфальтобетонной смеси на основе битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, было принято решение подобрать состав асфальтобетонной смеси типа Б марки II. Этот этап являлся критически важным, так как правильный выбор зернового состава напрямую влиял на прочностные характеристики и долговечность асфальтобетонного покрытия.

Также стоит отметить, что выбор компонентов для асфальтобетонной смеси не ограничивался только их физико-механическими свойствами. Важным аспектом являлась также экологическая безопасность используемых материалов. Например, применение модифицированных битумов с добавлением резиновой крошки не только улучшало эксплуатационные характеристики покрытия, но и способствовало утилизации отходов резинотехнической продукции, что являлось актуальной задачей в условиях современного экологического кризиса.

Таким образом, процесс подбора состава асфальтобетонной смеси представлял собой комплексный и многогранный процесс, который требовал внимательного подхода к выбору материалов и технологий. Это позволило не только достичь высоких эксплуатационных характеристик дорожных покрытий, но и обеспечило их долговечность и устойчивость к внешним воздействиям, что особенно важно для регионов с суровыми климатическими условиями, таких как Кемеровская область.

Результаты выполненного подбора зернового состава минеральной части асфальтобетонной смеси представлены в таблице 1 и на рисунке.

Учитывая, что в горячем плотном мелкозернистом асфальтобетоне типа Б ориентировочное содержание битума составляло от 4,0 до 5,0 %, было принято решение приготовить три партии асфальтобетона с содержанием модифицированного резиновой крошкой битума в количестве 4,0, 4,5 и 5,0 % сверх 100 % минеральной части. Физико-механические свойства асфальтобетона приведены в таблице 2.

Таблица 1

Подобранный зерновой состав асфальтобетона

Наименование материала	Количество материала, %	Частные (полные) остатки (полные проходы) на ситах, %, имеющих размер ячеек, мм									
		20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071
Щебень фр. 5–20	52	4,42	17,03	14,91	13,54	2,10	–	–	–	–	–
Песок из отсе- вов дробления	43	–	–	–	1,29	12,47	7,98	8,3	4,9	3,4	2,1
Минеральный порошок	5	–	–	–	–	–	–	–	0,08	0,64	0,74
Минеральная часть асфальто- бетонной смеси	полные остатки, %	4,42	21,45	36,36	51,19	65,76	73,74	82,05	86,99	91,07	93,92
	полные проходы, %	95,58	78,55	63,64	48,81	34,24	26,26	19,75	13,01	8,93	6,08

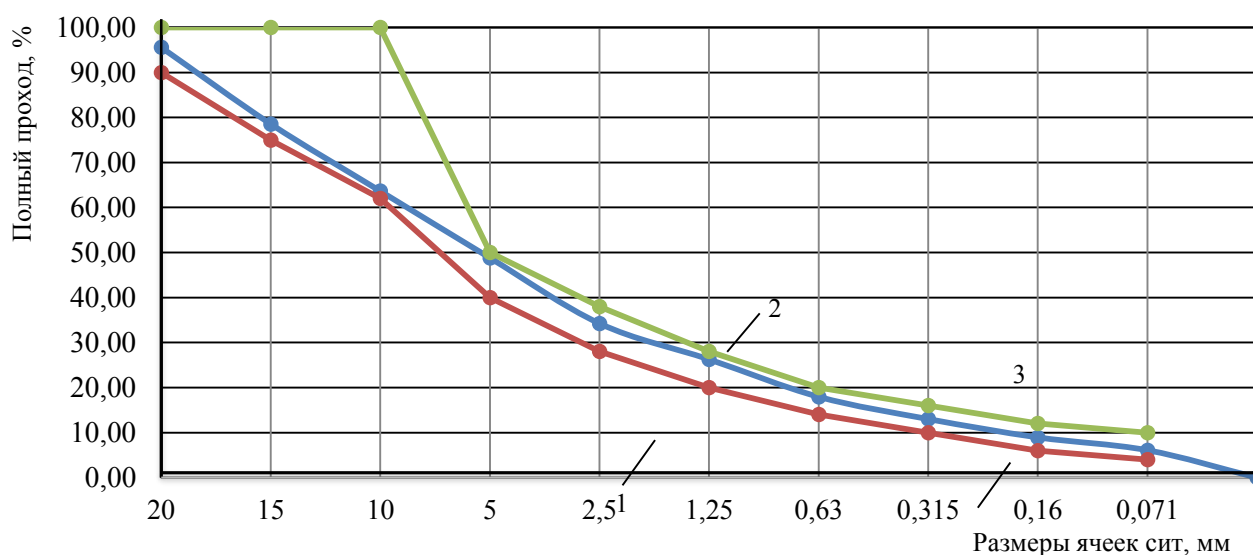


Рисунок – Кривая распределения зернового состава подобранного асфальтобетона:

- 1 – нижняя допустимая граница зернового состава;
- 2 – верхняя допустимая граница зернового состава;
- 3 – принятый зерновой состав

Таблица 2

Зависимость физико-механических свойств асфальтобетона от содержания битума, модифицированного резиновой крошкой

Наименование показателя	Требования для III дорожно-климатической зоны	Содержание битума, модифицированного резиновой крошкой, %		
		4,0	4,5	5,0
1	2	3	4	5
Средняя плотность, г/см ³	не нормируется	2,50	2,50	2,50
Водонасыщение, % по объему, образцов, отформованных из смесей	1,5–3,5	1,85	1,68	1,09
Предел прочности при сжатии, при температуре 0 °С, МПа	не более 9,0	7,80	8,70	7,0
Предел прочности при сжатии, при температуре 20 °С, МПа	не менее 2,0	3,78	4,26	3,21
Предел прочности при сжатии, при температуре 50 °С, МПа	не менее 0,9	1,35	1,63	1,34

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Сдвигоустойчивость по коэффициенту внутреннего трения	не менее 0,87	0,96	0,96	0,93
Сдвигоустойчивость по сцеплению при температуре 50 °С, МПа	не менее 0,20	0,43	0,44	0,42
Трещиностойкость по пределу прочности на растяжение при расколе при температуре 0 °С и скорости деформирования 50 мм/мин, МПа	2,8–6,0	3,34	4,50	3,60
Водостойкость	не менее 0,90	1,00	0,99	0,98
Водостойкость при длительном водонасыщении	не менее 0,85	0,90	0,82	0,81

Анализ полученных данных показал, что оптимальное содержание битума, модифицированного резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, составляет 4,0 %. Для сопоставления физико-механических свойств асфальтобетонов подобранного состава были приготовлены четыре партии на следующих вяжущих:

- битум марки БНД 70/100 в количестве 4,6 % сверх 100 % минеральной части;
- битум марки БНД 60/90 в количестве 4,6 % сверх 100 % минеральной части, модифицированный адгезионной присадкой StarflexLD, в количестве 4,0 % от массы;
- полимерно-битумное вяжущее марки ПБВ 90 в количестве 4,0 % сверх 100 % минеральной части;
- битум, модифицированный резиновой крошкой при двухстадийном технологическом процессе, в количестве 4,5 % сверх 100 % минеральной части.

Физико-механические свойства асфальтобетонов на различных вяжущих приведены в таблице 3.

Таблица 3

Физико-механические свойства асфальтобетонов на различных вяжущих

Наименование показателя	Требования для III дорожно-климатической зоны	Значение показателей для асфальтобетона, полученного на основе:			
		БНД	БНД+ПАВ	ПБВ	РБВ
Средняя плотность, г/см ³	не нормируется	2,43	2,44	2,43	2,50
Водонасыщение, % по объему, образцов, отформованных из смесей	1,5–3,5	2,35	0,84	3,20	1,95
Предел прочности при сжатии при температуре 0 °С, МПа	не более 9,0	8,20	8,30	7,60	7,85
Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С, МПа	не менее 2,0	3,70	3,40	3,25	3,60
Предел прочности при сжатии при температуре 50 °С, МПа	не менее 0,9	1,65	1,43	1,26	1,35
Сдвигоустойчивость по коэффициенту внутреннего трения	не менее 0,87	0,97	0,96	0,95	0,96
Сдвигоустойчивость по сцеплению при температуре 50 °С, МПа	не менее 0,20	0,35	0,34	0,33	0,41
Трещиностойкость по пределу прочности на растяжение при расколе при температуре 0 °С и скорости деформирования 50 мм/мин, МПа	2,8–6,0	3,70	4,30	2,55	3,40
Водостойкость	не менее 0,90	0,78	0,92	0,91	1,00
Водостойкость при длительном водонасыщении	не менее 0,85	0,76	0,84	0,72	0,90
Водостойкость при водонасыщении в течение 30 сут	не норм.	0,73	0,79	0,62	0,87

При использовании двухстадийного технологического процесса резиновая крошка способствует улучшению распределения битума в смеси, что позволяет добиться более однородной структуры и, следовательно, более высоких эксплуатационных характеристик.

Одним из значительных преимуществ асфальтобетона, модифицированного резиновой крошкой, является его высокая сдвигоустойчивость. Исследования показывают, что сцепление при сдвиге у данного типа асфальтобетона на 0,03–0,07 МПа выше, чем у других смесей. Это свидетельствует о том, что более теплостойкое вяжущее, используемое в такой смеси, обеспечивает повышенное сопротивление сдвиговым нагрузкам. В результате дорожные покрытия, выполненные из такого асфальтобетона, будут менее подвержены колееобразованию, что особенно актуально для участков с интенсивным движением.

Заключение

С каждым годом резиновой крошки будет образовываться больше в связи с увеличивающимся потоком автотранспорта и его доступностью. Помимо прочего, покрышки, произведенные из частично натуральных каучуков (используется для производства покрышек для транспорта с высокими осевыми нагрузками), благоприятным образом влияют на физико-механические свойства вяжущих, используемых для получения асфальтобетонных смесей.

Применение резиновой крошки в модифицировании органических вяжущих приносит ряд преимуществ.

Во-первых, увеличивается долговечность асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов соответственно из-за повышения эластичности, прочностных свойств, а также повышенного интервала пластичности вяжущего.

Во-вторых, модификация по двухстадийному процессу влечет за собой минимизацию составляющих компонентов по отношению к конкурентным составам и, как следствие, снижение конечной стоимости продукта.

В-третьих, решается глобальная экологическая проблема по складированию и загрязнению окружающих территорий путем выделения вредных веществ в атмосферу и почву, поскольку составы, которые используются для производства автомобильных шин, являются достаточно токсичными для окружающих.

Итак, подобная технология и методы утилизации этого отхода положительно скажутся на развитии каждого субъекта Российской Федерации.

Библиография

1. *Вольфсон С.И.* Разработка полимерных добавок для модификации дорожного битума. Сообщение 2. Использование модифицированного дорожного битума в асфальтобетонах и щебеночно-мастичных асфальтобетонах // Вестник технологического университета. – 2016. – № 17. – С. 37–40.
2. *Вольфсон С.И.* Модификация битумов, как способ повышения их эксплуатационных свойств // Вестник технологического университета. – 2016. – № 17. – С. 29–33.
3. *Аюпов Д.А.* Старение битум-полимерных вяжущих // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 15. – С. 126–129.
4. *Аюпов Д.А., Мурафа А.В., Макаров Д.Б. и др.* Наномодифицированные битумные вяжущие для асфальтобетона // Жилищное строительство. – 2010. – № 10. – С. 34–35.
5. *Аюпов Д.А., Потапова Л.И., Мурафа А.В. и др.* Исследование взаимодействия битумов с полимерами // Строительные материалы. – 2011. – № 1. – С. 140.
6. *Минхаирова А.И., Закирова Л.Ю., Вольфсон И.С. и др.* Модификация дорожных битумов смесями термоэластопластами // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 17. – С. 120–122.
7. *Мурафа А.В., Аюпов Д.А., Хозин В.Г.* Битумно-резиновые вяжущие строительного назначения: учеб. пособие / М-во образования и науки Российской Федерации, Казанский гос. архитектурно-строит. ун-т. – Казань, 2012.
8. *Пузакова Е.В., Закирова Л.Ю., Вольфсон И.С. и др.* Влияние состава термоэластопластов на свойства модифицированных битумов // Вестник Казанского технологич. ун-та. – 2013. – Т. 16, № 1. – С. 120–121.

9. *Makarov D., Ayupov D., Murafa A. et al.* Compatibility studies of mixed thermoplastic rubber with road bitumen // *Open Civil Engineering Journal*. – 2014. – Vol. 8, № 1. – С. 124–129.
10. *Ayupov D., Makarov D., Murafa A. et al.* Modular mobility investigation of polymer binder bitumen // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Advanced Materials in Construction and Engineering*. Сер. "International Scientific Conference of Young Scientists: Advanced Materials in Construction and Engineering, TSUAB 2014". – 2015. – P. 012003.
11. *Макаров Д.Б., Ягунд Э.М., Аюпов Д.А. и др.* Изучение битумно-полимерных вяжущих, модифицированных смесевыми термоэластопластами, методом ИК-спектроскопии // *Известия Казанского гос. архитектурно-строит. ун-та*. – 2015. – N 4. – С. 280–286.
12. Вяжущие и резиноасфальтобетоны БИТРЕК. Опыт применения // ООО НПГ «ИНФОТЕХ». – М., 2014. – 20 с.
13. ГОСТ 33133-2014. Дороги автомобильные общего пользования БИТУМЫ НЕФТЯНЫЕ ДОРОЖНЫЕ ВЯЗКИЕ [Текст] // Стандартинформ. – М., 2014.
14. *Андриади Ю.Г.* Комплексно модифицированное полимерно-битумное вяжущее для верхних слоев асфальтобетонных покрытий: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. – Ростов-н/Д., 1999. – 156 с.
15. *Бегункова Н.И.* Исследование применения отходов производства полимеров в качестве улучшающих добавок в асфальтобетоне // *Тр. Гос. всесоюз. дор. НИИ*. – 1977. – Вып. 99. – С. 102–109.
16. *Аюпов Д.А.* Наномодифицированные битумные вяжущие для асфальтобетона // *Строительные материалы*. – 2010. – № 10. – С. 34–36.
17. *Аюпов Д.А., Потапова Л.И., Мурафа А.В. и др.* Современные способы регенерации резин и возможности использования их в строительной отрасли // *Строительные материалы*. – 2011. – № 5. – С. 260.
18. *Дьяков К.А., Черсков Р.М., Зинченко Е.В.* Эффект эластичных покрытий // *Автомобильные дороги*. – 2012. – № 2. – С. 112–114.
19. *Никольский В.Г.* «Унирем» и другие модификаторы // *Автомобильные дороги*. – 2010. – № 3. – С. 28–29.
20. Битумнорезиновые экологически чистые композиционные материалы БИТРЭК [Электронный ресурс] // *bitrack.ru* – Режим доступа: <http://www.bitrack.ru>. – Загл. с экрана.
21. *Abdulwarith B., Norhidayah H., Hanif M. et al.* Effects of mixture design variables on rubber-bitumen interaction: properties of dry mixed rubberized asphalt mixture // *Materials and Structures*. – 2016. – P. 97–103.
22. *Mull M. A., Stuart K., Yehia A.* Fracture resistance characterization of chemically modified crumb rubber asphalt pavement // *Journal of Materials Science*. – 2002. – Vol. 37. – P. 557–566.
23. *Kim H., Lee S., Amirkhanian S.* Rheology investigation of crumb rubber modified asphalt binders // *KSCE Journal of Civil Engineering*. – 2010. – Vol. 14. – P. 839–843.
24. *Урханова Л.А., Шестаков Н.И., Буянтуев С.Л. и др.* Использование углеродных наноматериалов для получения эффективного дорожно-строительного композита // *Вестник ВСГУТУ*. – 2014. – № 6 (51). – С. 67–72.
25. *Урханова Л.А., Шалбуев Д.В., Рудаков Е.О.* Повышение деформативно-прочностных характеристик щебеночно-мастичного асфальтобетона на основе битума, модифицированного коллоидной добавкой // *Вестник ВСГУТУ*. – 2014. – № 2 (81). – С. 75–81.

Bibliography

1. *Wolfson S.I.* Development of polymer additives for modifying road bitumen. Message 2. Use of modified road bitumen in asphalt concrete and crushed stone-mastic asphalt concrete // *Bulletin of the Technological University*. – 2016. – N 17. – P. 37–40.
2. *Wolfson S.I.* Modification of bitumen as a way to improve their performance properties // *Bulletin of the Technological University*. – 2016. – N 17. – P. 29–33.
3. *Ayupov D.A.* Aging of bitumen-polymer binders // *Bulletin of the Kazan Technological University*. – 2013. – Vol. 16, N 15. – P. 126–129.
4. *Ayupov D.A., Murafa A.V., Makarov D.B. et al.* Nano-modified bitumen binders for asphalt concrete // *Housing Construction* – 2010. – N 10. – P. 34–35

5. *Ayupov D.A., Potapova L.I., Murafa A.V. et al.* Interaction of bitumen with polymers // Construction materials. – 2011. – N 1. – P. 140.
6. *Minkhairova A.I., Zakirova L.Yu., Wolfson I.S. et al.* Modification of road bitumen with mixed thermoplastic elastomers // Bulletin of the Kazan Technological University. – 2012. – Vol. 15, N 17. – P. 120–122.
7. *Murafa A.V., Ayupov D.A., Khozin V.G.* Bitumen-rubber binders for construction purposes: Textbook / Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Kazan State University of Architecture and Engineering. – Kazan, 2012.
8. *Puzakova E.V., Zakirova L.Yu., Wolfson I.S. et al.* Influence of the composition of thermoplastic elastomers on the properties of modified bitumen // Bulletin of the Kazan Technological University. – 2013. – Vol 16, N 1. – P. 120–121.
9. *Makarov D., Ayupov D., Murafa A. et al.* Compatibility studies of mixed thermo-plastic rubber with road bitumen // Open Civil Engineering Journal. – 2014. – Vol. 8, N 1. – P. 124–129.
10. *Ayupov D., Makarov D., Murafa A. et al.* Modular mobility investigation of polymer binder bitumen // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Advanced Materials in Construction and Engineering. Ser. «International Scientific Conference of Young Scientists: Advanced Materials in Construction and Engineering, TSUAB 2014», 2015. – P. 012003.
11. *Makarov D.B., Yagund E.M., Ayupov D.A. et al.* Study of bitumen-polymer binders modified with mixed thermoplastic elastomers using infrared spectroscopy // News of the Kazan State University of Architecture and Construction. – 2015. – N 4. – P. 280–286.
12. Binder and rubber asphalt concrete BITREC. Application experience // Research and Production Group INFOTECH LLC. – M., 2014. – 20 p.
13. GOST 33133-2014 Roads for public use OIL ROAD VISCOUS BITUMENS / Standardinform. – M., 2014.
14. *Andriadi Yu.G.* Complex modified polymer-bitumen binder for top layers of asphalt concrete pavements: diss. ...Cand. Sc. Engineering: 05.23.05. – Rostov-on-Don, 1999. – 156 p.
15. *Begunkova N.I.* Study of the use of polymer production waste as improving additives in asphalt concrete // State All-Union Road Research Institute. – 1977. – Issue. 99. – P. 102–109.
16. *Ayupov D.A.* Nanomodified bitumen binders for asphalt concrete // Construction materials. – 2010. – N 10. – P. 34–36.
17. *Ayupov D.A., Potapova L.I., Murafa A.V. et al.* Modern methods of rubber regeneration and the possibility of using them in the construction industry // Construction materials. – 2011. – N 5. – P. 260.
18. *Dyakov K.A., Cherskov R.M., Zinchenko E.V.* Effect of elastic coatings // Automobile roads. – 2012. – N 2. – P. 112–114.
19. *Nikolsky V.G.* «Unirem» and other modifiers // Automobile roads. – 2010. – N 3. – P. 28–29.
20. BITUMEN RUBBER ENVIRONMENTALLY FRIENDLY COMPOSITE MATERIALS BITREK [Electronic resource] // bitrack.ru – Access mode: <http://www.bitrack.ru>. – Cap. from the screen.
21. *Abdulwarith B., Norhidayah H., Hanif M. et al.* Effects of mixture design variables on rubber-bitumen interaction: properties of dry mixed rubberized asphalt mixture // Materials and Structures. – 2016. – P. 97–103.
22. *Mull M. A., Stuart K., Yehia A.* Fracture resistance characterization of chemically modified crumb rubber asphalt pavement // Journal of Materials Science. – 2002. – Vol. 37. – P. 557–566.
23. *Kim H., Lee S., Amirkhanian S.* Rheology investigation of crumb rubber modified asphalt binders // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2010. – Vol. 14. – P. 839–843.
24. *Urkhanova L.A., Shestakov N.I., Buyantuev S.L. et al.* The use of carbon nanomaterials for effective road construction composite // ESSUTM Bulletin. – 2014. – N 6 (51). – P. 67–72.
25. *Urkhanova L.A., Shalbuev D.V., Rudakov E.O.* Improving the deformation and strength characteristics of crushed stone-mastic asphalt concrete based on bitumen modified with a colloidal additive // ESSUTM Bulletin. – 2014. – N 2 (81). – P. 75–81.

DOI 10.53980/24131997_2024_4_96

Е.В. Кравчук¹, ст. преподаватель, e-mail: ollgart@mail.ru
А.А. Иодчик², канд. техн. наук, доц., e-mail: 001168@pnu.edu.ru
В.А. Кравчук², д-р техн. наук, проф., e-mail: 000415@pnu.edu.ru
¹ Дальневосточный государственный университет путей сообщения
² Тихоокеанский государственный университет
г. Хабаровск

УДК 624.072.14

РЕСУРС НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТРАДИЦИОННЫХ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ БАЛОК ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ РАБОТЕ МАТЕРИАЛА ИХ СТЕНКИ

В статье теоретически определена максимальная несущая способность традиционных биметаллических балок, оптимальное распределение материала по поясным листам и стенке, определена высота зоны текучести материала стенки. Установлено, что в случае применения для поясов биметаллической балки высокопрочных сталей по ГОСТ 27720 пластические деформации материала стенки проникают в глубь сечения на расстояние $0,3h$ (h – высота сечения балки). Шарнир пластичности в материале стенки отсутствует. Решена задача поиска глубины, протяженности и площади пластических деформаций в биметаллических балках, предварительно напряженных вытяжкой стенки. На основании работ Н. А. Махутова и Р. Петерсона определены коэффициент концентрации напряжений и коэффициент безопасности предварительно напряженных балок. Ресурс балок с зоной пластических деформаций в стенке 1,338. При циклическом нагружении балки ее предварительные напряжения снижают уровень напряжений, вызывающих пластические деформации и на 9–10-м цикле нагружения текучесть материала стенки ликвидируется. Установлен закон монотонного уменьшения высоты зоны пластического деформирования материала стенки балки. Определен приведенный модуль упругости материала предварительно напряженной балки, находящейся в состоянии упругопластического деформирования. Установлено, что запас относительных пластических деформаций равен 1,738. На основании четвертой энергетической теории Губера, Мизеса и Генки определены предельные приведенные напряжения, свидетельствующие об отсутствии вероятности хрупких трещин в зоне пластических деформаций материала стенки. Установлены локальный предел текучести материала и его коэффициент жесткости.

Ключевые слова: биметаллические балки, пластические деформации, предварительные напряжения, ресурс.

E.V. Kravchuk¹, Senior Lecturer
A.A. Iodchik², Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.
V.A. Kravchuk², Dr. Sc. Engineering, Prof.
¹ Far Eastern State Transport University
² Pacific National University
Khabarovsk

LOAD-CARRYING ABILITY OF TRADITIONAL AND PRE-STRESSED BIMETALLIC BEAMS UNDER PLASTIC RESPONSE OF THEIR WALL MATERIAL

The article theoretically determines maximum load-carrying ability of traditional bimetallic beams, optimal distribution of material along flange sheets and wall, and height of wall material zone of flowage. It is established that using high-strength steels according to GOST 27720 for bimetallic beam flanges, plastic deformations of wall material penetrate into depth of beam section at the distance of $0.3h$ (h -height of beam section). There is no plasticity hinge in wall material. The problem of finding depth, length and areas of plastic

deformations in bimetallic beams prestressed by wall stretching is solved. Based on the works of N. A. Makhutov and R. Peterson, stress concentration coefficient and safety factor of pre-stressed beams are determined. Service life of beams with zone of plastic deformation in wall is 1.338. When a beam is cyclically loaded, its prestresses reduce the level of stresses causing plastic deformation and at the 9th or 10th loading cycle, fluidity of wall material is eliminated. The study establishes the law of monotonic decrease in the height of plastic deformation zone of beam wall material. Reduced modulus of elasticity of the material of prestressed beam in state of elastic-plastic deformation is determined. It is established that margin of relative plastic deformation is 1.738. Based on the fourth energy theory of Huber, Mises and Gencki, limiting reduced stresses are determined, indicating absence of brittle cracks probability in plastic deformation zone of wall material. The local yield limit of material and its stiffness coefficient are established.

Key words: *bimetallic beams, plastic deformations, prestresses, resource.*

Введение

Известно, что во всех металлических конструкциях в период их изготовления возникают пластические деформации, вызванные их сваркой, болтовыми или заклепочными соединениями. Многочисленные работы академиков Е. О. Патона [1], Н. Н. Давиденкова [2], профессоров В. П. Вологодина [3, 4], Н. А. Гликмана [5, 6], П. И. Кудрявцева [7, 8], Г. А. Николаева [9, 10], Н. С. Окерблома [11, 12] и других убедительно раскрывают физические процессы при сварке металлов.

В процессе эксплуатации металлические конструкции, прежде всего балки, находятся под воздействием различных нагрузок, которые вызывают в них разнообразное напряженное состояние, иногда сопровождающееся пластическими деформациями. Исследованию влияния пластических деформации на хрупкость и вязкость стали, выносливость конструкций, их хладноломкость и коррозионную стойкость, напряженно-деформированное состояние при статических, динамических и сейсмических нагрузках посвящено большое количество научных исследований.

Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений изложены в фундаментальных работах В. В. Болотина [13], Г. Нейбера [20], А. Р. Ржаницина [21], А. Г. Ройтмана [22], сопротивлению элементов конструкций хрупкому разрушению посвящена работа [14], работа стальных металлических балок при низких температурах освещена в монографиях [15, 16], хрупкие разрушения сварных конструкций изложены в работе [17], механике хрупкого разрушения посвящена работа [18], практические приемы определения коэффициентов концентрации в металлических конструкциях сформулированы в монографии [19]. ЦНИИПС им. Н. П. Мельникова в 1989 г. подготовил руководство по расчету стальных конструкций на хрупкую прочность [23]. Активную исследовательскую работу по изучению сопротивляемости стали хрупкому разрушению в агрессивных средах [24], пластическим деформациям [25, 26] ведут вузовские коллективы России. Рекомендации по учету пластических деформаций при расчете фланцевых соединений изложены в статье [27]. Развитие пластических деформаций в стальных составных стержнях показано в работе [28]. Напряженное и деформированное состояние предварительно напряженных стержней рассмотрено в работах [29–32].

Цель работы – предложить методику оценки ресурса балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки при пластической работе ее материала в зоне максимального момента внешних нагрузок.

Материалы и методы

Разработчиками эффективных балочных конструкций установлено, что 75 % несущей способности составных балок приходится на поясные листы и только 25 % – на стенку конструкции. Следовательно, на основании принципа совмещения функций, применяя в поясах балок высокопрочную сталь, можно многократно увеличить их способность воспринимать внешнюю нагрузку. В данном случае речь идет о проектировании биметаллических стальных изгибаемых элементов. Очевидно, что в предельном состоянии конструкции при условии, что

материалом поясных листов является высокопрочная сталь, которая находится в упругом состоянии, в материале стенки возникнут пластические деформации.

Для решения задачи о несущей способности биметаллической балки с частичной текучестью материала стенки рассмотрим ее поперечное сечение, показанное на рисунке 1.

Обозначим расчетное сопротивление материала пояса балки βR_y (R_y – расчетное сопротивление малоуглеродистой стали в стенке балки, $\beta = R_y^v / R_y$; R_y^v – расчетное сопротивление материала поясных листов из высокопрочной стали).

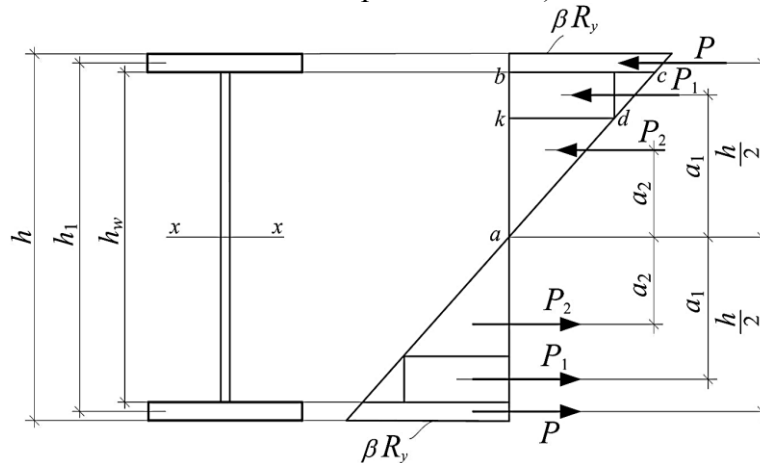


Рисунок 1 – Расчетная схема биметаллической балки

Из подобия треугольников abc и akd можем записать,

$$\frac{ab}{bc} = \frac{ak}{kd}, \text{ или } \frac{h}{2\beta R_y} = \frac{ak}{R_y}.$$

Откуда находим, что

$$ak = \frac{h}{2\beta}. \quad (1)$$

В крайних фибрах стенки высота зоны текучести ее материала

$$e = bk = \frac{h}{2} - ak = \frac{h(\beta - 1)}{2\beta}. \quad (2)$$

Расстояние от центра тяжести зоны текучести стенки до нейтральной оси балки

$$a_1 = ak + \frac{e}{2} = \frac{h(\beta + 1)}{4\beta}. \quad (3)$$

Расстояние от центра тяжести зоны упругой работы материала стенки до нейтральной оси балки равно

$$a_2 = \frac{2ak}{3} = \frac{h}{3\beta}. \quad (4)$$

На основании теории сооружений момент внутренних усилий определяется из эпюры нормальных напряжений в поперечном сечении балки

$$M \leq |M| = Ph + P_2 \times 2a_1 + P_2 \times 2a_2. \quad (5)$$

Усилие P , действующее по центру тяжести поясных листов,

$$P = A_f \gamma_f \beta R_y = \frac{AR_y \beta (1 - \gamma_w)}{2}. \quad (6)$$

($\gamma_f = A_f / A$ – коэффициент распределения материала по поясным листам, $\gamma_f = (1 - \gamma_w) / 2$; $\gamma_w = A_w / A$ – коэффициент распределения материала по площади стенки A_w).

Усилие P_1 действует по центру тяжести зоны текучести материала стенки

$$P_1 = et_w R_y = \frac{\gamma_w A (\beta - 1) R_y}{2\beta}. \quad (7)$$

Усилие P_2 действует по центру тяжести упругой зоны материала стенки

$$P_2 = \frac{1}{2} akt_w R_y = \frac{\gamma_w A R_y}{4\beta}. \quad (8)$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} [M] &= \frac{A R_y \beta (1 - \gamma_w) h}{2} + \frac{\gamma_w A R_y (\beta - 1)}{2\beta} 2 \frac{h}{2\beta} (\beta + 1) + \frac{A R_y \gamma_w}{4\beta} 2 \frac{h}{3\beta} = \\ &= \frac{A R_y h (6\beta^3 - \gamma_w)(6\beta^3 - 3\beta^2 + 1)}{2 \cdot 6\beta^2} \end{aligned} \quad (9)$$

Высоту поперечного сечения биметаллического двутавра запишем в виде

$$h = \gamma_w^{1/2} \sqrt{A n_w}. \quad (10)$$

(n_w – гибкость стенки балки).

Следовательно,

$$[M] = \frac{R_y A \sqrt{A n_w}}{2} \left[\frac{6\beta^3 \gamma_w^{1/2} - \gamma_w^{3/2} (6\beta^3 - 3\beta^2 + 1)}{6\beta^2} \right]. \quad (11)$$

Первая производная от момента внутренних усилий $[M]$ по переменному параметру, характеризующему распределение материала по стенке балки γ_w , позволит определить его оптимальное значение

$$\begin{aligned} \frac{d[M]}{d\gamma_w} &= \frac{R_y A \sqrt{A n_w}}{2 \cdot 6\beta^2} \left[6 \frac{\beta^3}{2\gamma_w^{1/2}} - \frac{3}{2} \gamma_w^{1/2} (6\beta^3 - 3\beta^2 + 1) \right] = 0; \\ \gamma_w^{opt} &= \frac{2\beta^3}{(6\beta^3 - 3\beta^2 + 1)}. \end{aligned} \quad (12)$$

Коэффициент распределения материала по поясам балок

$$\gamma_f = \frac{1 - \gamma_w}{2} = \frac{4\beta^3 - 3\beta^2 + 1}{2(6\beta^3 - 3\beta^2 + 1)}. \quad (13)$$

Уместно отметить, когда $\beta = R_y^v / R_y = 1,0$, что характерно для традиционной симметричной монометаллической балки, $\gamma_w = 0,5, \gamma_f = 0,25$.

Подставляя зависимость (12) в выражение (9), находим, что

$$[M] = \frac{R_y A h \beta}{3}, \quad (14)$$

или же, с учетом высоты поперечного сечения балки по формуле (10)

$$[M] = R_y A \sqrt{A n_w} \times C_{bm}, \quad (15)$$

где

$$C_{bm} = \frac{1}{3} \left[\frac{2\beta^5}{6\beta^3 - 3\beta^2 + 1} \right]^{1/2}.$$

Если в поясах биметаллической балки применить сталь С590 (ГОСТ 27772) ($R_y^v = 59,0 \text{ кН} / \text{см}^2$), а в стенке – С235 ($R_y = 23,5 \text{ кН} / \text{см}^2$), то несущая способность балки окажется равной

$$[M] = R_y A^{3/2} n^{1/2} \times \frac{1}{3} \left[\frac{2 \cdot \left(\frac{59}{23,5}\right)^5}{6 \left(\frac{59}{23,5}\right)^3 - 3 \left(\frac{59}{23,5}\right)^2 + 1} \right]^{1/2} = 0,379 \times A^{3/2} R_y n^{1/2}. \quad (16)$$

Это в 1,6 раза выше несущей способности традиционной монометаллической балки.

Высота зоны текучести материала стенки при расчетном сопротивлении материала поясов $R_y^v = 59,0 \text{ кН} / \text{см}^2$ будет равной

$$e = \frac{h(\beta - 1)}{2\beta} = \frac{h}{2} \times \frac{(2,51 - 1)}{2,51} = 0,3h. \quad (17)$$

Полученный результат свидетельствует о том, что в случае применения в поясных листах биметаллических балок стали по ГОСТ 27772 шарнир пластичности в зоне максимального изгибающего момента исключен. Зона упругой работы материала стенки никогда не будет меньше $0,4h$.

В биметаллических балках, предварительно напряженных вытяжкой стенки, текучесть материала стенки наблюдается только в ее нижней области.

Профессор В. А. Кравчук [26] установил, что высота зоны пластического деформирования в указанных балках

$$e_1 = h \times \frac{K + 1}{5K + 3} = 0,235h, \quad (18)$$

протяженность зоны

$$x = 1,476 \times \sqrt{lh}, \quad (19)$$

а ее площадь

$$F = \int_0^{l/2,08} \frac{0,11}{l} x^2 dx = \frac{0,11}{l} \times \frac{1}{3} \left(\frac{l}{2,08}\right)^3. \quad (20)$$

Заметим, что в предварительно напряженных балках высота зоны текучести материала стенки на 21,6 % меньше, чем в традиционных конструкциях.

Поскольку нижний поясной лист предварительно напряженной балки выполняется из высокопрочной стали, находящейся в состоянии упругого деформирования, пластические деформации стенки в районе нижнего пояса находятся в стесненных условиях. Нижний пояс выполняет роль условной затяжки, не позволяющей осуществлять распространение пластических деформаций в стенке. Пластические деформации являются источником концентраторов напряжений и возможного хрупкого разрушения металла стенки балки.

На основании работ Н. А. Махутова [14] определен коэффициент концентрации напряжений

$$\alpha_f = \frac{\sigma_{wn}^s}{R_y} = \frac{34,44}{23} = 1,497 < \alpha_{max} = \frac{R_{un}}{R_y} = \frac{36}{23} = 1,565. \quad (21)$$

(σ_{wn}^s – максимальное нормальное предварительные напряжение в нижней зоне стенки балки,

$$\sigma_{wn}^s = R_y \frac{3K + 2}{(2K + 1)} = 34,44 \text{ кН} / \text{см}^2).$$

Работы Р. Петерсона [19] позволяют установить, что коэффициент безопасности предварительно напряженных балок

$$n = \frac{L_b R_{un}}{\sigma_{wn}^s} = \frac{1,22 \times 36}{34,44} = 1,275. \quad (22)$$

Здесь R_{un} – временное сопротивление разрыву стали С235, $R_{un} = 36$ кН/см²; L_b – коэффициент предельного состояния при изгибе. При высоте зоны пластических деформаций $e = 0,235 \times h$, согласно [18], Р. Петерсон рекомендует принимать $L_b = 1,22$.

Учитывая коэффициент концентрации напряжений $\alpha_f = 1,497$, который меньше пороговых значений $\alpha_{max} = 1,565$ (Н. А. Махутов) и коэффициент безопасности балок $n = 1,275$ (Р. Петерсон), можно надеяться, что ресурс предварительно напряженной балки, имеющей пластические деформации в стенке

$$\zeta = \frac{n \alpha_{max}}{\alpha_f} = 1,3338. \quad (23)$$

В предварительно напряженных балках, жестко закрепленных в опорных узлах, кроме усилий от внешней нагрузки и предварительного напряжения, действует еще опорный момент M_{op} , вектор которого направлен в сторону, противоположную вектору внешней нагрузки.

Указанный момент создает нормальные напряжения, превосходящие напряжения σ_{wn}^s , нижняя зона балки оказывается сжатой, растягивающие напряжения, создающие пластические деформации в нижней зоне стенки теперь уже находятся в зоне сжатия и погашаются. Имеет место «замыкание» пластической зоны. Материал всей предварительно напряженной балки находится в упругой области. Ресурс балки значительно повышается.

В процессе цикла «разгрузка-нагрузка» предварительно напряженной балки в зоне пластического деформирования материала нижней области стенки появляется разгружающее усилие P_5 (рис. 2), которое создает изгибающий момент M_5 , а также сжимающие напряжения в верхней и растягивающие – в нижней областях конструкции.

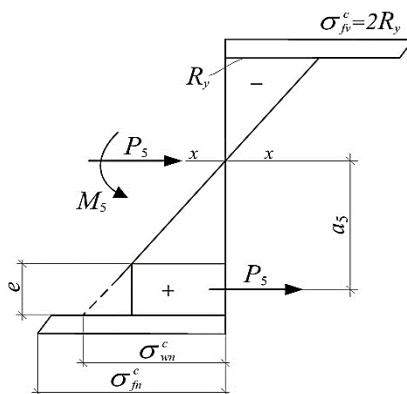


Рисунок 2 – Упругопластическая разгрузка балки

Алгебраическое сложение указанных напряжений с предварительными напряжениями балки, позволяет уменьшить напряжения пластического деформирования материала стенки на 65 % и снизить высоту зоны текучести ее материала. Закон монотонного уменьшения высоты зоны пластического деформирования

$$f(n) = 0,24 h_{pr} \times (0,65)^n, \quad (24)$$

где n – количество циклов «разгрузка-нагрузка» балки.

Численные значения пошагового уменьшения зоны текучести стенки показаны в таблице. График указанного процесса представлен на рисунке 3.

Пошаговое изменение коэффициента f

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f(n)$	$0,126h$	$0,099h$	$0,0645h$	$0,042h$	$0,027h$	$0,017h$	$0,011h$	$0,075h$	$0,005h$	$0,003h$

Незначительные циклические воздействия на предварительно напряженную балку снижают уровень пластических деформаций стенки, материал конструкции приближается к упругой работе и выносливость конструкции будет повышаться. Поскольку материал стенки предварительно напряженной балки находится в двух состояниях – пластического и упругого деформирования, целесообразно определить приведенный модуль упругости балок.

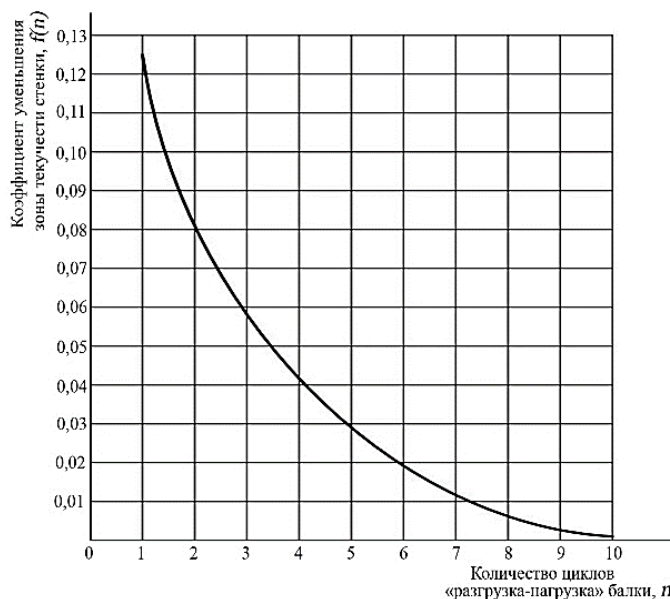


Рисунок 3 – Изменение высоты пластической зоны в нижней области стенки при циклическом нагружении балки

Поиск приведенного модуля упругости балки T решается на основании предположения о том, что изгибная жесткость TI_x предварительно напряженной балки, имеющей зону пластического деформирования некоторой части материала стенки, равна изгибной жесткости EI_{x0} этой балки, весь материал которой находится в упругой области.

$$TI_x = EI_{x0} \tag{25}$$

Здесь T – приведенный модуль упругости балки, материал которой находится в состоянии упругопластического деформирования; I_x, I_{x0} – момент инерции поперечного сечения балки при упругопластическом деформировании материала и при упругой его работе.

Момент инерции поперечного сечения предварительно напряженной балки (рис. 4), весь материал которой находится в состоянии упругого деформирования запишем в виде

$$I_{x0} = A_{fv} \times y_1^2 + 0,755 \times ht_w \times y_3^2 + \frac{t_w(0,755 \times h)^3}{12} + A_{fn}y_5^2 \tag{26}$$

Здесь A_{fv} – площадь сечения верхнего пояса балки, $A_{fv} = 0,292 \times A$; A – площадь поперечного сечения предварительно напряженной балки; y_1 – расстояние от нейтральной оси тавра, образованного верхним поясом балки и участком стенки $(h - e) = 0,755 \times h$ (e – высота площадки текучести материала стенки предварительно напряженной балки, $e = 0,245 \times h$, до цен-

тра тяжести верхнего поясного листа ($y_1 = 0,2378 \times h$); $A_w = 0,496 \times A$; y – расстояние от нейтральной оси тавра до центра тяжести стенки, $y_3 \frac{0,755 \times h}{2} - y_1 = 0,1397 \times h$; $0,755 \times h$ – часть стенки балки, материал которой находится в упругой области; t_w – толщина стенки балки; A_{fn} – площадь нижнего пояса балки, $A_{fn} = 0,211 \times A$; y_5 – расстояние от центра тяжести тавра до нижнего пояса, $y_5 = h - y_1 = 0,7622 \times h$; y_4 – расстояние от нейтральной оси тавра до центра тяжести пластической зоны стенки, $y_4 = 0,3947 \times h$.

Кроме того,
$$y_2 = \frac{(0,7555h)(K+1)}{(2+K)} = 0,5172 \times h.$$

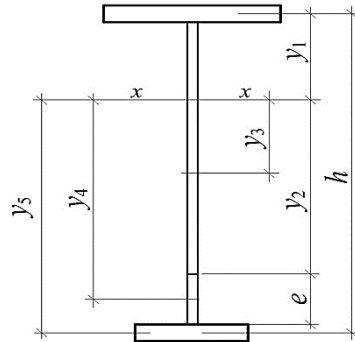


Рисунок 4 – Расчетная схема поперечного сечения упругой зоны предварительно напряженной балки

Таким образом,

$$I_{xo} = 0,161 \times Ah^2. \quad (27)$$

Момент инерции предварительно напряженной балки

$$I_x = \frac{2}{3} \frac{Ah^2}{(K+1)^2} = 0,1655877 \times Ah^2. \quad (28)$$

Приведенный модуль упругости

$$T = \frac{I_{xo}}{I_x} E = \frac{0,161 \times Ah^2}{0,1655877 \times Ah^2} = 0,972 \times E. \quad (29)$$

Из работ В. А. Кравчука известно, что напряжение, создающее пластические деформации в нижней зоне стенки балки, определяется выражением

$$\sigma_{wn} = R_y \times \frac{3K+2}{2K+1} = 23 \times \frac{3 \cdot 1,175 + 2}{2 \cdot 1,175 + 1} = 37,932 \text{ кН/см}^2.$$

Относительная деформация ε_{nl} , материала стенки балки, находящейся в состоянии пластического деформирования, с учетом приведенного модуля упругости T будет равна

$$\varepsilon_{nl} = \frac{\sigma_{wn}}{0,972 \times E} = 0,0018583.$$

Полученное значение относительной деформации меньше прогнозируемой

$$\varepsilon_{ост} = \frac{3R_y}{0,972 \times E} = 0,00338,$$

установленной на основе метода расчета металлических конструкций с учетом ограниченных пластических деформаций.

Запас фактических относительных деформаций

$$\zeta = \varepsilon_{ост} / \varepsilon_{nl} = 0,00338 / 0,0018583 = 1,819.$$

Это означает, что по критерию пластических деформаций, ресурс их развития в материале стенки предварительно напряженной балки равен 1,819.

Полученное значение приведенного модуля упругости материала справедливо для предварительно напряженной балки, нагруженной статическими нагрузками. Когда же конструкция будет находиться под действием циклически приложенных внешних нагрузок, то на основании наших выводов о выносливости балки зона пластического деформирования стенки балки будет монотонно снижаться и приведенный модуль T будет приближаться к модулю упругости E .

Поскольку нижняя область стенки балки находится в состоянии пластического деформирования, существует вероятность хрупкого разрушения материала стенки. Согласно четвертой энергетической теории Губера, Мизеса и Генки, пластическая сталь начинает разрушаться тогда, когда приведенные напряжения σ_i достигают значений, определяемых выражением

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2]} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{2[\sigma_{wn}^s + (0,25 \times \sigma_{wn}^s)^2 - \sigma_{wn}^s \times 0,25 \cdot \sigma_{wn}^s]} = \\ &= 30,69 \text{ кН/см}^2 < R_u = 35,0 \text{ кН/см}^2 \end{aligned} \quad (30)$$

(σ_1, σ_2 – главные напряжения, R_u – временное сопротивление разрыву стали С235).

Общеизвестно, что в области действия максимального изгибающего момента вектор главных напряжений совпадает с вектором нормальных напряжений и указанные напряжения равны между собой. Следовательно, продольное главное напряжение $\sigma_1 = \sigma_{wn}^s = 34,44 \text{ кН/см}^2$. Поперечное главное напряжение σ_2 , с учетом коэффициента Пуассона, будет равно

$$\sigma_2 = 0,25 \times \sigma_{wn}^s = 34,44 \times 0,25 = 8,6175 \text{ кН/см}^2.$$

Поскольку фактические приведенные напряжения σ_i меньше временного сопротивления стали R_u , хрупкие трещины в нижней зоне стенки предварительно напряженной балки будут отсутствовать.

Фактические напряжения в поясных листах и стенке предварительно напряженных балок меньше предельных расчетных сопротивлений стали на растяжение и сдвиг и, следовательно, хрупкое и вязкое разрушения при упругой работе материала исключены.

Локальный предел текучести

$$\sigma_l = K_i \sigma_T = 0,283 \times 23,5 = 6,66 \text{ см}^2 \ll R_{yn} = 23,5 \text{ кН/см}^2. \quad (31)$$

Здесь K_i – коэффициент жесткости напряженного состояния.

$$K_i = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{(1-\alpha)^2 + (\alpha-\beta)^2 + (\beta-1)^2}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{(1-\frac{34,44}{8,6})^2 + (\frac{34,44}{8,6}-1)^2}} = 0,283. \quad (32)$$

$$\alpha = \sigma_1 / \sigma_2; \beta = \sigma_3 / \sigma_1.$$

Здесь σ_T – предел текучести стали С235 при одноосном нагружении;

$$\sigma_T = R_{yn} = 23,5 \text{ кН/см}^2.$$

Значение локального предела текучести материала стенки свидетельствует об ограниченных пластических деформациях и малой вероятности хрупких разрушений в этой области.

Заключение

1. Применение в поясных листах биметаллических балок высокопрочной стали по ГОСТ 27772 не сопровождается шарниром пластичности в поперечном сечении конструкции.

2. Пластические деформации нижней области стенки предварительно напряженных балок не вызывают хрупких трещин в ее материале.

Библиография

1. Патон Е.О. Влияние усадочных напряжений на прочность сварных конструкций // Автогенное дело. – 1937. – № 3.
2. Давиденков Н.Н. Об остаточных напряжениях // Заводская лаборатория. – 1935. – № 6.
3. Вологдин В.П. Коробление судовых конструкций от сварки. – Л.: Речиздат, 1938.
4. Вологдин В.П. Деформации и напряжения при сварке судовых конструкций. – Л.: Оборонгиз, 1945.
5. Гликман Н.А. Методы определения сварочных напряжений // Труды ЛИЭИ. – 1960. – Вып. 30.
6. Гликман Н.А. Устойчивость остаточных напряжений и их влияние на технологические свойства металла и прочность изделий // Труды ЛИЭИ, 1956. – Вып. 13.
7. Кудрявцев П.И. Остаточные сварочные напряжения и прочность сооружений. – М.: Машиностроение, 1964.
8. Кудрявцев П.И. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении. – М.: Машгиз, 1951.
9. Николаев Г.А. Методы борьбы с собственными напряжениями в сварных конструкциях // Автогенное дело. – 1940. – № 10.
10. Николаев Г.А., Гельман А.С. Сварные конструкции и соединения. – М.: Машгиз, 1947.
11. Окерблом Н.С. Влияние усадочных напряжений на прочность сварных конструкций // Автогенное дело. – 1937. – № 7.
12. Окерблом Н.С. Расчет деформаций металлических конструкций при сварке. – М.; Л.: Машгиз, 1955.
13. Болотин В.В. Методы теории вероятностей им теории надежности в расчетах сооружений. – М.: Стройиздат, 1982.
14. Махутов Н.А. Сопротивление элементов конструкций хрупкому разрушению. – М.: Metallургия, 1973.
15. Сильвестров А.В. Повышение надежности стальных конструкций, эксплуатирующихся при низких температурах. – Новосибирск, 1977.
16. Солодарь М.Б., Плишкин Ю.С. [и др.]. Металлические конструкции для строительства на Севере. – Л.: Стройиздат. 1981.
17. Холл У., Кихара Х., Зут В. и др. Хрупкие разрушения сварных конструкций: пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1974.
18. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974.
19. Петерсон Р. Коэффициенты концентрации напряжений. Графики и формулы для расчета элементов конструкций на прочность. – М.: Мир, 1977.
20. Нейбер Г. Концентрация напряжений: пер. с нем. – М.; Л.: Гостехиздат, 1947.
21. Ржаницин А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. – М.: Стройиздат, 1978.
22. Ройтман А.Г. Надежность конструкций эксплуатируемых зданий. – М.: Стройиздат, 1985.
23. Руководство по расчету стальных конструкций на хрупкую прочность. – М.: ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова, 1989.
24. Филимонов В.В. Сопротивляемость сталей хрупкому разрушению в строительных конструкциях, эксплуатирующихся агрессивных средах: автореф. ... канд. техн. наук. – М., 1977.
25. Соколовский В.В. Теория пластичности: автореф. ... канд. техн. наук. – М., 1977.
26. Кравчук В.А. Стальные стержни, предварительно напряженные без затяжек. – М.: АСВ, 2015.
27. Ведяков И.И., Конин Д.В., Олуромби А.Р. и др. Учет пластических деформаций при расчете фланцевых соединений // Промышленное и гражданское строительство. – 2021. – № 10. – С. 9–16. – DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.09-16.
28. Белый Г.И., Гарипов А.И. Запредельное напряженно-деформированное состояние в поперечных сечениях элементов стальных конструкций // Вестник гражданских инженеров. – 2022. – № 4 (93). – С. 16–30. – DOI:10.232968/1999-5571-2022-19-4-16-30.
29. Чебровский А.А., Кравчук В.А. Касательные напряжения в балках, предварительно напряженных вытяжкой стенки // Вестник ВСГУТУ. – 2014. – № 6. – С. 49–52.

30. Чебровский А.А., Кравчук В.А., Аюшев Т.В. Исследование касательных напряжений в приопорной зоне стенки балки, предварительно напряженной вытяжкой стенки // Вестник ВСГУТУ. – 2015. – № 3 (64). – С. 42–48.

31. Чебровский А.А., Кравчук В.А. Исследование локальных напряжений в средней зоне стальных балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки, при действии сосредоточенной силы // Вестник ВСГУТУ. – 2017. – № 1. – С. 61–66.

32. Кравчук В.А., Аюшеев Т.В., Балхаева В.Д. Влияние сварочных напряжений и деформаций на напряженно-деформированное состояние составных балок, предварительно напряженных вытяжкой стенки // Вестник ВСГУТУ. – 2018. – № 4. – С. 55–64.

Bibliography

1. Paton E.O. Influence of shrinkage stresses on welded structures strength // Autogenous engineering. – 1937. – N 3.

2. Davidenkov N.N. On residual stresses // Factory Laboratory. – 1935. – N 6.

3. Vologdin V.P. Warping of ship structures from welding. – L.: Rechizdat Publishing House, 1938.

4. Vologdin V.P. Deformations and stresses during welding of ship structures. – L.: Oborongiz Publishing House, 1945.

5. Glikman N.A. Methods for determining welding stresses // Proceedings of Leningrad Engineering and Economic Institute. – 1960. – Issue 30.

6. Glikman N.A. Stability of residual stresses and their influence on the technological properties of metal and strength of products // Proceedings of Leningrad Engineering and Economic Institute. – 1956. – Issue 13.

7. Kudryavtsev P.I. Residual welding stresses and strength of structures. – M.: Mechanical Engineering Publishing House, 1964.

8. Kudryavtsev P.I. Internal stresses as a reserve of strength in mechanical engineering. – M.: Mashgiz Publishing House, 1951.

9. Nikolaev G.A. Methods of dealing with self-stresses in welded structures // Autogenous engineering. – 1940. – N 10.

10. Nikolaev G.A., Gelman A.S. Welded structures and connections. – M.: Mashgiz Publishing House, 1947.

11. Okerblom N.S. Influence of shrinkage stresses on the strength of welded structures // Autogenous engineering. – 1937. – N 7.

12. Okerblom N.S. Calculation of deformations of metal structures during welding. – M.; L.: Mashgiz Publishing House, 1955.

13. Bolotin V.V. Methods of probability theory and reliability theory in calculations of structures. – M.: Stroyizdat Publishing House, 1982.

14. Makhutov N.A. Resistance of structural elements to brittle fracture. – M.: Metallurgy Publishing House, 1973.

15. Silvestrov A.V. Increasing the reliability of steel structures operating at low temperatures. – Novosibirsk, 1977.

16. Solodar M.B., Plishkin Yu.S. [et al.]. Metal structures for construction in the North. – L.: Stroyizdat Publishing House, 1981.

17. Hall W., Kihara H., Zut V. et al. Brittle fractures of welded structures. – M.: Mechanical Engineering Publishing House, 1974.

18. Cherepanov G.P. Mechanics of brittle fracture. – M.: Nauka Publishing House, 1974.

19. Peterson R. Coefficients of stress concentration. Graphs and formulas for calculating structural elements for strength. – M.: Mir Publishing House 1977.

20. Neuber G. Stress concentration. – M.; L.: Gostekhizdat Publishing House, 1947.

21. Rzhantsin A.R. Theory of calculation of building structures for reliability. – M.: Stroyizdat Publishing House, 1978.

22. Roitman A.G. Reliability of structures of buildings in use. – M.: Stroyizdat Publishing House, 1985.

23. Guidelines for Brittle Strength Calculations of Steel Structures. – M.: CNIIPSK Im. Melnikova, 1989.

24. Filimonov V.V. Resistance of steels to brittle fracture in building structures operating in aggressive environments: abstract. diss. ... Cand. Sc. Engineering. – M., 1977.

25. *Sokolovsky V.V.* Theory of plasticity: abstract. diss. ... Cand. Sc. Engineering. – M., 1977.
26. *Kravchuk V.A.* Steel rods, pre-stressed without tightening. – M.: ASV Publishing House, 2015.
27. *Vedyakov I.I., Konin D.V., Olurombi A.R. et al.* Accounting for plastic deformations when calculating flange connections // *Industrial and civil engineering*. – 2021. – N 10. – P. 9–16. – DOI: 10.33622/0869-7019.2021.10.09-16.
28. *Belyi G.I., Garipov A.I.* Extreme stress-strain state in the cross sections of steel structure elements. // *Bulletin of Civil Engineers*. – 2022. – N 4 (93). – P. 16–30. – DOI:10.232968/1999-5571-2022-19-4-16-30.
29. *Chebrovskiy A.A., Kravchuk V.A.* Tangential stresses in beams pre-stressed by stretching wall // *ESSUTM Bulletin*. – 2014. – N 6. – P. 49–52.
30. *Chebrovskiy A.A., Kravchuk V.A., Ayushev T.V.* The research of tangential stresses in the support zone of the steel beam, prestressed by the wall stretching // *ESSUTM Bulletin*. – 2015. – N 3 (64). – P. 42–48.
31. *Chebrovskiy A.A., Kravchuk V.A.* The research of local tension in the average zone of the previously stressed steel beam, at action of the concentrated force // *ESSUTM Bulletin*. – 2017. – N 1. – P. 61–66.
32. *Kravchuk V.A., Ayushev T.V., Balkhaeva V.D.* The influence of welding stresses and strains on the stress-strain state of composite beams, prestressed by thin wall drawing // *ESSUTM Bulletin*. – 2018. – N 4. – P. 55–64.

DOI 10.53980/24131997_2024_4_108

Н.П. Лукутцова, д-р техн. наук, проф., e-mail: natluk58@mail.ru

А.А. Пыкин, канд. техн. наук, доц., e-mail: alexem87@yandex.ru

Е.С. Башарин, аспирант, e-mail: basharin.zhenya@yandex.ru

П.В. Дубовской, аспирант, e-mail: pawel.dubovskoj2013@yandex.ru

Брянский государственный инженерно-технологический университет, г. Брянск

УДК 691.33

ВЛИЯНИЕ НАНОСУСПЕНЗИИ МЕТАКАОЛИНА НА СВОЙСТВА ГИПСОБЕТОНА С ДРЕВЕСНЫМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

В статье представлены результаты исследования физико-механических свойств бетона на гипсовом вяжущем и древесном заполнителе для внутренних перегородок зданий с использованием наносuspензии, полученной путем ультразвукового диспергирования метакaoлина (МКЛН) в водной среде суперпластификатора С-3 (СП С-3). Построена математическая модель зависимости седиментационной устойчивости наносuspензии от массовой концентрации МКЛН, СП С-3 и продолжительности воздействия ультразвуком. Определены размеры и дзета-потенциал частиц наносuspензии. Установлено, что разработанная наносuspензия позволяет повысить прочность и водостойкость гипсобетона с древесным заполнителем и снизить его водопоглощение.

Ключевые слова: гипсобетон, древесный заполнитель, метакaoлин, наносuspензия, прочность, водостойкость, водопоглощение.

N.P. Lukutsova, Dr. Sc. Engineering, Prof.

A.A. Pykin, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

E.S. Basharin, PG student

P.V. Dubovskoy, PG student

Bryansk State University of Engineering and Technology, Bryansk

EFFECT OF METAKAOLIN NANOSUSPENSION ON THE PROPERTIES OF GYPSUM CONCRETE WITH WOOD FILLER

The article presents the study of physical and mechanical properties of concrete with gypsum binder and wood filler. The concrete is designed for internal partitions of buildings and contains nanosuspension obtained by ultrasonic dispersion of metakaolin (MKLN) in aqueous medium of superplasticizer S-3 (SP S-3). The study represents a mathematical model of the dependence of nanosuspension sedimentation stability on mass concentration of MKLN, SP S-3 and exposure duration to ultrasound. The sizes and zeta potential of nanosuspension particles are determined. It is established that the developed nanosuspension allows to increase the strength and water resistance of gypsum concrete with wood filler, as well as to reduce its water absorption.

Key words: gypsum concrete, wood filler, metakaolin, nanosuspension, strength, water resistance, water absorption.

Введение

Известно, что гипсобетон (далее – ГБ) с древесным заполнителем (далее – ДЗ) является стойким к негативному воздействию водорастворимых редуцирующих веществ (сахаров) древесины и отличается хорошими адгезионными свойствами. Гипсовые вяжущие позволяют снизить гигроскопичность, горючесть, склонность к загниванию и поражению микроорганизмами древесного заполнителя [1–3].

Тем не менее ГБ с ДЗ характеризуется низкими прочностью и водостойкостью. Одним из решений данной проблемы может быть использование минеральных добавок природного и

искусственного происхождения как отдельно, так и в комплексе с суперпластификаторами, способствующих формированию плотной и прочной гипсовой матрицы [4–11].

В данном контексте большой научно-практический интерес вызывает метакаолин ($\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2$) – тонкодисперсная активная минеральная добавка, получаемая термической обработкой природной глины (каолина) [12–15].

Цель работы – исследование влияния наносuspензии метакаолина на физико-механические свойства гипсобетона с древесным наполнителем (ГБ с ДЗ) для внутренних перегородок зданий.

Материалы и методы исследования

Для изготовления образцов ГБ с ДЗ применялись:

- гипсовое вяжущее марки Г-16 Б III ГОСТ 125-2018;
- абсолютно сухие березовые и сосновые опилки размером 1–5 мм;
- наносuspензия (далее – НС), полученная путем ультразвукового диспергирования (УЗД) метакаолина (МКЛН) по ГОСТ Р 59536-2021 со средним диаметром частиц 14 мкм в водной среде суперпластификатора С-3 (СП С-3) по ТУ 5870-002-58042865-03;
- вода затворения, объем которой в составах смесей определялся по водогипсовому отношению, соответствующему водопотребности гипсового вяжущего (36–40 %).

Приготовление гипсобетонных смесей осуществлялось в смесителе принудительного действия при последовательном дозировании древесных опилок, смоченных 2/3 частями воды, гипсового вяжущего и наносuspензии МКЛН, растворенной в 1/3 части воды.

Свойства ГБ с ДЗ определялись на образцах размерами 40×40×160 мм, которые были изготовлены виброуплотнением смесей в трехгнездовых формах и испытаны через 2 ч после их твердения в воздушно-сухих условиях и последующего высушивания до постоянной массы при температуре $(50 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Устойчивость НС к процессу седиментации (оседанию частиц МКЛН в водной дисперсионной среде под действием силы тяжести) оценивалась по объему осадка в наносuspензии через 24 ч экспозиции с помощью седиментометра Н.А. Фигуровского.

Размер частиц наносuspензии анализировался методом фотонно-корреляционной спектроскопии на приборе ZetaPlus с многоугловой системой 90Plus/Bi-MAS, а ее устойчивость к процессу агрегации (укрупнению частиц и образованию агрегатов) – методом электрофоретического светорассеяния по значению дзета-потенциала через 24 ч экспозиции.

Структура гипсовой матрицы ГБ исследовалась на электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU.

Результаты исследования и их обсуждение

Разработка оптимального состава наносuspензии метакаолина выполнялась с помощью трехфакторного плана эксперимента типа В-D13 в соответствии с матрицей, представленной в таблице 1, и заключалась в построении математической модели зависимости седиментационной устойчивости НС от массовой концентрации твердой фазы и продолжительности ультразвукового диспергирования.

Выбор факторов, уровней и интервалов их варьирования был обусловлен поиском значений, обеспечивающих получение НС с повышенной седиментационной устойчивостью, то есть с минимальным объемом осадка.

Математическая модель зависимости объема осадка (y) в наносuspензии от массовой концентрации МКЛН (x_1), СП С-3 (x_2) и продолжительности УЗД (x_3) описывалась уравнением регрессии, содержащим значимые коэффициенты по критерию Стьюдента и являющимся адекватным по критерию Фишера для оценки седиментационной устойчивости НС с достоверной вероятностью 95 %:

$$y = 10,62 + 5,39x_1 - 14,02x_2 - 2,31x_3 + 7,63x_1^2 + 17,48x_2^2 - 3,26x_3^2 - 2,15x_1x_2 - 4,17x_1x_3. \quad (1)$$

Матрица трехфакторного плана эксперимента по оптимизации состава наносuspензии метакаолина

№ опыта	Кодированное значение фактора			Натуральное значение фактора		
	x ₁	x ₂	x ₃	МКЛН, г/л	С-3, г/л	УЗД, мин
1	-1	-1	-1	1	0	4
2	+1	-1	-1	9	0	4
3	-1	+1	-1	1	5	4
4	-1	-1	+1	1	0	8
5	-1	+0,19	+0,19	1	2,98	6,38
6	+0,19	-1	+0,19	5,76	0	6,38
7	+0,19	+0,19	-1	5,76	2,98	4
8	-0,29	+1	+1	3,84	5	8
9	-1	-0,29	+1	9	1,78	8
10	+1	+1	-0,29	9	5	5,42

По коэффициентам уравнения регрессии (1) был выполнен расчет объема осадка в НС в зависимости от заданных варьируемых факторов, характер влияния которых отображался поверхностями отклика (рис. 1), построенными с помощью компьютерной программы Sigma Plot. Из результатов математического моделирования следует, что для получения наносuspензии метакаолина с повышенной седиментационной устойчивостью наиболее оптимальным являлся состав НС, включающий 5 г/л метакаолина и 3,75 г/л суперпластификатора С-3, при продолжительности воздействия ультразвуком 8 мин. В данном случае объем осадка в НС не превышал 3 %.

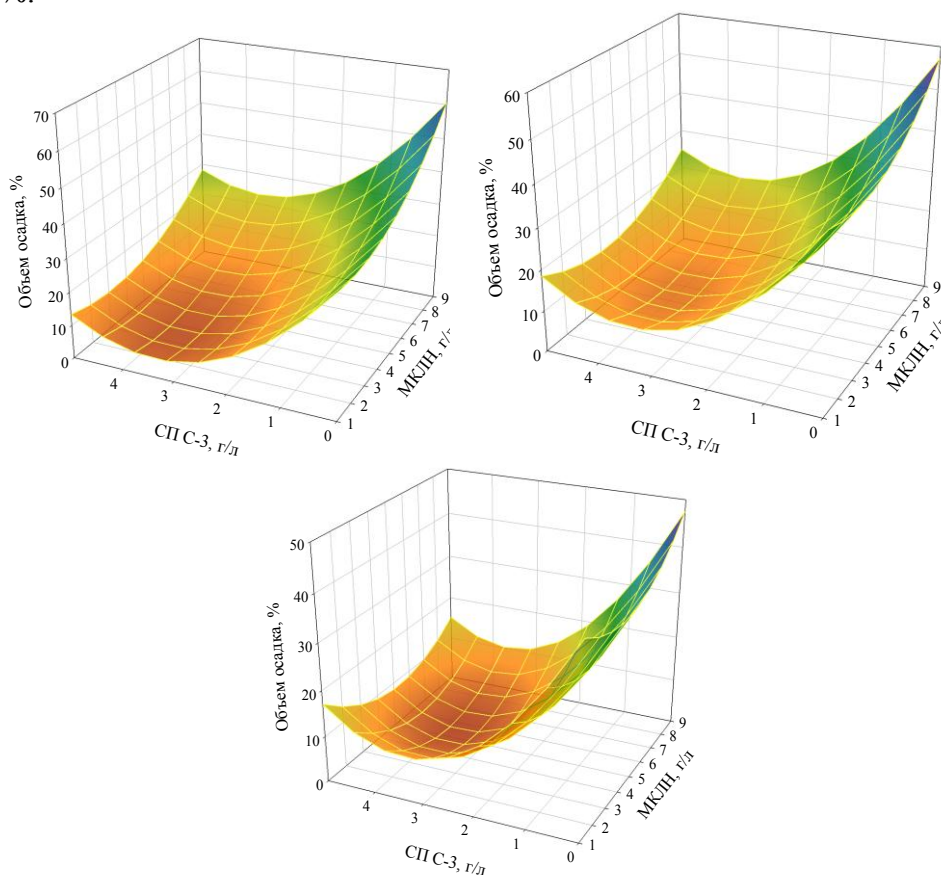


Рисунок 1 – Поверхности отклика математической модели зависимости объема осадка в наносuspензии метакаолина от варьируемых факторов:
 а – УЗД 4 мин; б – УЗД 6 мин; в – УЗД 8 мин

Установлено, что ультразвуковое диспергирование МКЛН в водной среде СП С-3 способствовало образованию наносuspензии со средним значением дзета-потенциала частиц минус 72,8 мВ, что свидетельствовало о ее высокой устойчивости к процессу агрегации (рис. 2).

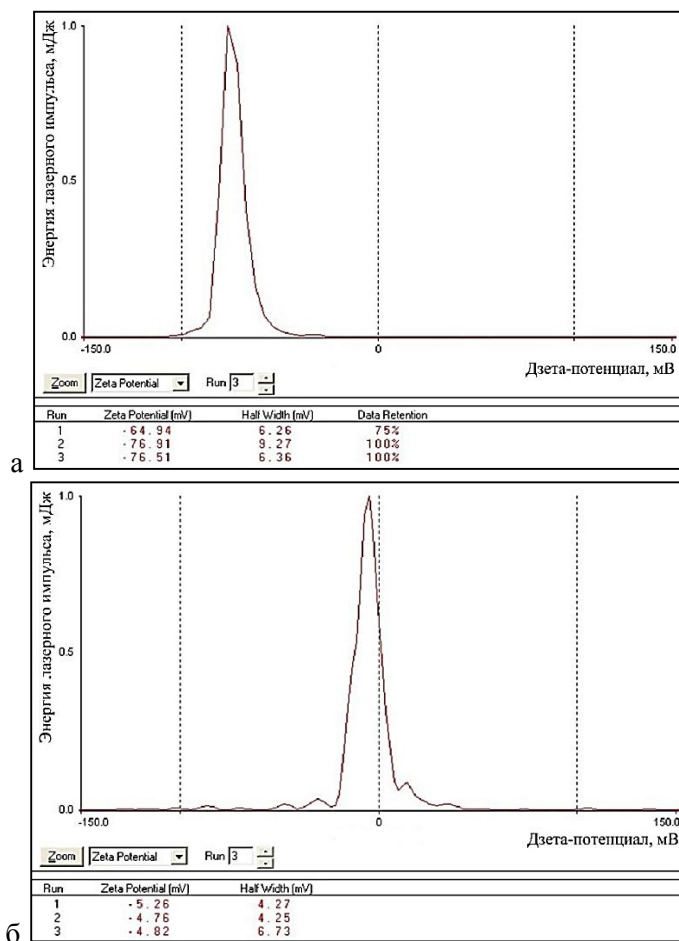


Рисунок 2 – Дзета-потенциал частиц метакаолина после УЗД в водной среде: а – с СП С-3; б – без СП С-3

В результате УЗД метакаолина в водной среде СП С-3 была получена наносuspензия, средний диаметр частиц которой составлял 70 нм (рис. 3 а).

При этом НС содержала 80 % частиц диаметром от 39 до 52 нм, 20 % частиц – от 55 до 224 нм. Следует отметить, что средний диаметр частиц метакаолина после УЗД в водной среде без СП С-3 не превышал 1330 нм (рис. 3 б).

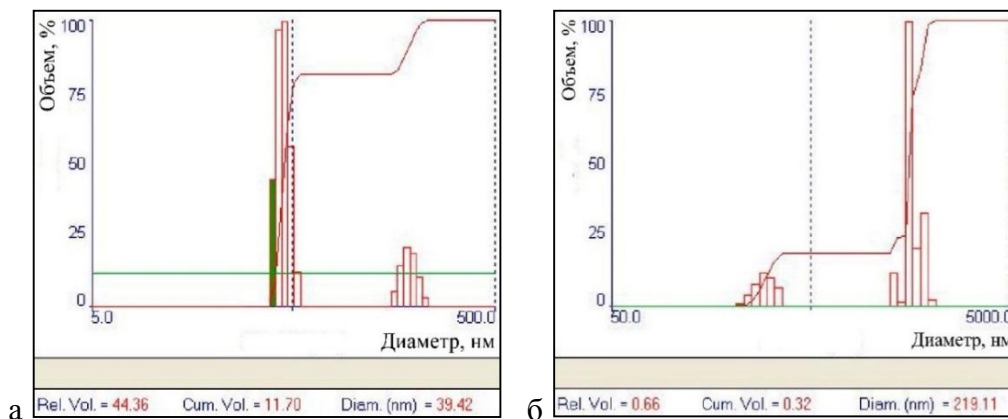


Рисунок 3 – Размеры частиц метакаолина после УЗД в водной среде: а – с СП С-3; б – без СП С-3

Результаты испытаний образцов гипсобетона с древесным наполнителем (табл. 2) показали, что зависимость его физико-механических свойств от содержания наносuspензии метакаолина носила экстремальный характер.

Таблица 2

Физико-механические свойства гипсобетона с древесным наполнителем

Состав на 1 м ³ гипсобетона				Показатели свойств					
древесные опилки, кг	гипсовое вяжущее, кг	наносuspензия метакаолина, л	вода, л	средняя плотность, кг/м ³	коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	прочность на изгиб, МПа	прочность на сжатие, МПа	водопоглощение по объему, %	водостойкость (коэффициент размягчения)
Гипсобетон с березовыми опилками									
170	1000	0	300	1190	0,18	7,1	8,3	9,8	0,58
		10	290	1205	0,19	7,7	9,2	9,6	0,61
		50	250	1223	0,20	8,3	10,9	9,5	0,72
		100	200	1224	0,20	9,5	14,1	9,3	0,78
		150	150	1210	0,19	8,2	12,6	9,6	0,72
		200	100	1204	0,19	7,5	9,1	9,7	0,60
Гипсобетон с сосновыми опилками									
140	1000	0	300	1150	0,15	4,9	6,8	8,3	0,52
		10	290	1160	0,15	5,3	7,4	8,2	0,54
		50	250	1175	0,16	6,2	9,5	8,1	0,65
		100	200	1210	0,17	7,3	12,2	7,8	0,73
		150	150	1170	0,16	6,1	11,3	8,0	0,66
		200	100	1159	0,15	5,1	7,2	8,1	0,54

Максимальные значения прочности и водостойкости ГБ с ДЗ достигались при использовании НС в количестве 10 % от массы гипсового вяжущего.

В данном случае прочность на изгиб ГБ с березовыми опилками повысилась в 1,3 раза, прочность на сжатие – в 1,7 раза, а водостойкость – в 1,3 раза.

При введении НС в состав гипсобетона с сосновыми опилками его прочность на изгиб увеличилась в 1,5 раза, прочность на сжатие – в 1,8 раза, водостойкость – в 1,4 раза.

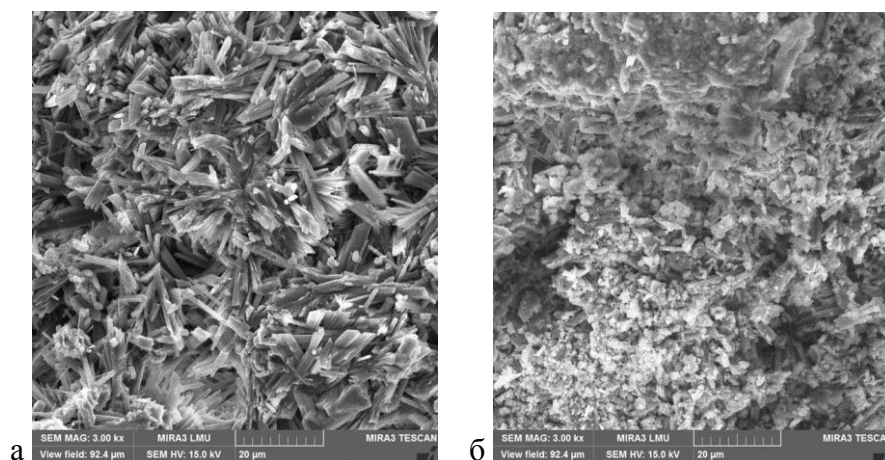


Рисунок 4 – Структура гипсовой матрицы в бетоне с древесным наполнителем (×3000): а – контрольный состав; б – состав с наносuspензией метакаолина

Повышение прочности и водостойкости ГБ с ДЗ обусловлено тем, что наночастицы метакаолина, стабилизированные суперпластификатором С-3, блокируют поверхность кристаллогидратов гипсового вяжущего, задерживают их рост и изменяют форму от пластинчатой до кубовидно-призматической, что способствовало формированию более плотной гипсовой матрицы (рис. 4).

Заключение

В ходе выполнения исследования установлено, что использование наносuspензии, полученной путем ультразвукового диспергирования метакаолина в водной среде суперпластификатора С-3, в количестве 10 % от массы гипсового вяжущего приводит к повышению прочности на изгиб в 1,3–1,5 раза, прочности на сжатие – в 1,7–1,8 раза, водостойкости – в 1,3–1,4 раза, а также снижению водопоглощения по объему на 5–6 % гипсобетона с березовыми и сосновыми опилками для внутренних перегородок зданий.

Библиография

1. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Лукаш А.А. и др. Математические модели зависимости структурных и деформационно-прочностных свойств гипсодревесного композита от компонентного состава // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2023. – № 7. – С. 17–26.
2. Лукутцова Н.П., Лукаш А.А., Пыкин А.А. и др. Математическое моделирование влияния сырьевых компонентов на прочность гипсодревесного композита // Деревообрабатывающая промышленность. – 2023. – № 2. – С. 51–58.
3. Мацкевич Я.Д., Парфенова Л.М., Закревская Л.В. Физико-механические свойства гипсобетона на основе низкомарочного гипсового вяжущего с органическим наполнителем // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – 2023. – № 3. – С. 34–40.
4. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Очиров Б.О. Опилкобетон, полученный с применением древесных отходов Республики Бурятия и ультрадисперсных добавок // Вестник ВСГУТУ. – 2021. – № 2 (81). – С. 69–74.
5. Батова М.Д., Семёнова Ю.А., Гордина А.Ф. и др. Структура и свойства гипсовых композиций с минеральными дисперсными добавками // Строительные материалы. – 2021. – № 10. – С. 49–53.
6. Рузина Н.С., Яковлев Г.И., Гордина А.Ф. и др. Модификация вяжущих на основе сульфата кальция комплексными добавками // Строительные материалы. – 2020. – № 7. – С. 18–22.
7. Изряднова О.В., Яковлев Г.И., Полянских И.С. и др. Изменение морфологии кристаллогидратов при введении ультра- и нанодисперсных модификаторов структуры в гипсоцементно-пуццолановые вяжущие // Строительные материалы. – 2014. – № 7. – С. 25–27.
8. Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Гордина А.Ф. и др. Модификация структуры и свойств гипсового вяжущего дисперсией технической сажи // Интеллектуальные системы в производстве. – 2019. – № 1. – С. 138–143.
9. Русина В.В., Дубровина Ю.Ю., Чернов Е.И. Бетоны для ограждающих конструкций на основе отходов механической переработки древесины // Строительные материалы. – 2017. – № 9. – С. 32–35.
10. Шешуков А.П., Лычагин Д.В., Макаров Е.Я. Исследование процессов формирования структуры арболита при химической активации древесины // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 3 (44). – С. 145–152.
11. Петропавловская В.Б. Использование минеральных ультрадисперсных модификаторов на основе отходов промышленности в гипсовых композитах // Строительные материалы. – 2018. – № 8. – С. 18–23.
12. Брыков А.С. Метакаолин // Цемент и его применение. – 2012. – № 4. – С. 36–40.
13. Михайлюта Е.С., Алексеев Е.В., Коледа В.В. и др. Особенности формирования фазового состава метакаолинов и его влияние на их свойства // Цемент и его применение. – 2012. – № 5. – С. 66–71.
14. Кирсанова А.А., Крамар Л.Я. Органоминеральные модификаторы на основе метакаолина для цементных бетонов // Строительные материалы. – 2013. – № 11. – С. 54–56.
15. Lukuttsova N.P., Pykin A.A. Stability of Nanodisperse Additives Based on Metakaolin // Glass and Ceramics. – 2015. – Vol. 71. – P. 383–386.

Bibliography

1. *Lukuttsova N.P., Pykin A.A., Lukash A.A. et al.* Mathematical models of dependence of structural and deformation strength properties of gypsum-wood composite on component composition // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. – 2023. – N 7. – P. 17–26.
2. *Lukuttsova N.P., Lukash A.A., Pykin A.A. et al.* Mathematical modeling of raw components influence on gypsumwood composite strength // Woodworking industry. – 2023. – N 2. – P. 51–58.
3. *Matskevich Ya.D., Parfenova L.M., Zakrevskaya L.V.* Physical and mechanical properties of gypsum concrete based on low-quality gypsum binder with organic filler // Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences. – 2023. – N 3. – P. 34–40.
4. *Urksanova L.A., Lkhasaranov S.A., Ochirov B.O.* Sawdust concrete obtained with the use of wood waste from the Republic of Buryatia and ultrafine additives // ESSUTM Bulletin. – 2021. – N 2 (81). – P. 69–74.
5. *Batova M.D., Semyenova Yu.A., Gordina A.F. et al.* Structure and properties of gypsum compositions with mineral dispersed additives // Construction Materials. – 2021. – N 10. – P. 49–53.
6. *Ruzina N.S., Yakovlev G.I., Gordina A.F. et al.* Modification of binders based on calcium sulfate with complex additives // Construction Materials, 2020. – N 7. – P. 18–22.
7. *Izryadnova O.V., Yakovlev G.I., Polyanskikh I.S. et al.* Change of morphology of crystal hydrates at incorporation of ultra- and nano disperse structures modifiers into gypsum cement-pozzolana binders // Construction Materials. – 2014. – N 7. – P. 25–27.
8. *Yakovlev G.I., Pervushin G.N., Gordina A.F. et al.* Technical carbon for modification of structure and properties of gypsum binder // Intelligent Systems in Manufacturing. – 2019. – N 1. – P. 138–143.
9. *Rusina V.V., Dubrovina Yu.Yu., Chernov E.I.* Concrete for enclosing structures based on waste from mechanical processing of wood // Construction Materials. – 2017. – N 9. – P. 32–35.
10. *Sheshukov A.P., Lychagin D.V., Makarov E.Ya.* Investigation of formation processes of wood concrete structure during chemical activation of wood // Journal of Construction and Architecture of Tomsk State University of Architecture and Building. – 2014. – N 3 (44). – P. 145–152.
11. *Petropavlovskaya V.B.* The use of mineral ultra-disperse modifiers on basis of industrial wastes in gypsum composites // Construction Materials. – 2018. – N 8. – P. 18–23.
12. *Brykov A.S.* Metakaolin // Cement and its Applications. – 2012. – N 4. – P. 36–40.
13. *Mikhailyuta E.S., Alekseev E.V., Koleda V.V. et al.* Specifics of phase composition formation of metakaolins and its influence on their properties // Cement and its Applications. – 2012. – N 5. – P. 66–71.
14. *Kirsanova A.A., Kramar L.Ya.* Organomineral modifiers based on metakaolin for cement concretes // Construction Materials. – 2013. – N 11. – P. 54–56.
15. *Lukuttsova N.P., Pykin A.A.* Stability of Nanodisperse Additives Based on Metakaolin // Glass and Ceramics. – 2015. – Vol. 71. – P. 383–386.

**1.3.14 – ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)**

DOI 10.53980/24131997_2024_4_115

С.Ю. Шишулькин¹, канд. техн. наук, доц., e-mail: voin-spec@yandex.ru

А.А. Москвитин², аспирант, e-mail: alex_moskva525@mail.ru

Ф.Л. Чан², аспирант, e-mail: tranluuphong66@gmail.com

Э.Н. Чередов², ст. преподаватель, e-mail: en.espp@yandex.ru

И.В. Старинский², канд. техн. наук, ст. преподаватель, e-mail: smittes@mail.ru

Нгуен Нгок Лан³, канд. техн. наук, доц.

¹ Бурятский государственный университет им. Д. Банзарова

² Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления
г. Улан-Удэ

³ Государственный университет транспорта и коммуникации, г. Ханой,
Социалистическая Республика Вьетнам

УДК 537.5

**ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ТРЕХФАЗНОГО СЕРИЕСНОГО РЕАКТОРА
НА СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

В статье описаны результаты эксперимента, цель которого – проанализировать энергетические характеристики установки «реактор плазменный трехфазный серийный, работающий по принципу электродуговых сталеплавильных печей». С его помощью получают каменное литье, расплавы из базальтовых пород, золошлаков ТЭС, стеклобоя.

Одна из главных задач – возможность проектирования и конфигурирования промышленных установок бóльшей мощности. Поскольку установка является нелинейным потребителем электроэнергии, нужно провести исследование потребляемой мощности в режиме работы, гармоник тока и напряжения и их амплитуд на входе источника питания, чтобы проанализировать, какое влияние оказывает на качество электроэнергии. С помощью полученных значений в дальнейшем становится возможным подбор защитного коммутационного и регулировочного оборудования, а также фильтров для улучшения качества потребляемой электроэнергии.

Ключевые слова: плазменный трехфазный серийный реактор, потребляемая мощность, гармоники тока, гармоники напряжения, энергетические характеристики, электромагнитная совместимость.

S.Yu. Shishulkin¹, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

A.A. Moskvitin², PG student

Ph.L. Tran², PG student

E.N. Cheredov², Senior Lecturer

I.V. Starinsky², Cand. Sc. Engineering, Senior Lecturer

Nguyen Ngoc Lan³, Cand. Sc. Engineering, Assoc. Prof.

¹Buryat State University named after. D. Banzarova

²East Siberian State University of Technology and Management
Ulan-Ude

³ State University of Transport and Communication, Hanoi, The Socialist Republic of Vietnam

**EFFECT OF PLASMA THREE-PHASE SERIES REACTOR
ON POWER SUPPLY NETWORKS**

The article describes experiment results analyzing energy characteristics of an installation - a three-phase serial plasma reactor operating on principle of electric arc steel-smelting furnaces. Stone castings, melts from basalt rocks, ash and slag from thermal power plants, and broken glass are obtained with its help.

One of the main tasks is the possibility of designing and configuring industrial installations of greater power. Since the installation is a non-linear consumer of electricity, it is necessary to conduct a study of power consumption in operating mode, current and voltage harmonics and their amplitudes at power source input in order to analyze what effect it has on the quality of electricity. Using the obtained numbers, it becomes possible

to select protective switching and control equipment, as well as filters to improve the quality of consumed electricity.

Key words: three-phase plasma series reactor, power consumption, current harmonics, voltage harmonics, energy characteristics, electromagnetic compatibility.

Введение

Мир не стоит на месте, а с ним развивается и вся инфраструктура, что приводит к увеличению нагрузок на энергосеть. Нагрузка же подразделяется на нелинейную, несимметричную и резкопеременную (ударную), это, в свою очередь, приводит к увеличению электромагнитных помех (далее – ЭМП). ЭМП создают негативное влияние на силовые установки, автоматику, релейную защиту и на электрооборудование, в свою очередь также создающее ЭМП. Все это так или иначе приводит к ухудшению качества электроэнергии, ее потерям и снижению надежности электроснабжения [1].

Рассмотрим воздействие ЭМП на электротермические установки. Для правильной работы электротермической установки требуются заданные параметры тока, напряжения, температуры в реакторе, угла управления и др., зависящие от таких параметров, как вид, область применения, конструктивные особенности самой установки и технологического процесса, качества электроэнергии. Фактором, влияющим на работу и износостойкость электротермических установок, является ЭМП. При анализе данных показателей наиболее значимым является параметр, характеризующий изменение напряжение от заданного, что приводит к потерям в электросетях. Во вторую очередь оценивается отклонение частоты сети, которое критично для индукционных печей, установок со встроенными преобразователями частоты. Существенное воздействие может оказываться на установки с конденсаторами, вызванное несинусоидальностью напряжения, которое также влияет на отклонение параметров напряжения, а колебания и просадки напряжения, напротив, оказывают несущественное влияние [1].

Реактор плазменный трехфазный серийный (далее – РПТС) представлен на рисунке 1. Электротермическая установка с входным током до 400 А и напряжением до 500 В, подключение производится к сети 380 В, частота 50 Гц с помощью тиристорного источника питания 4. Данная установка имеет три сириесных обмотки 5, подключенные на каждую из фаз от развязывающего трансформатора 3, роль источника выполняет регулируемый тиристорный преобразователь 4, который может выдавать как переменный, так и постоянный ток [2].

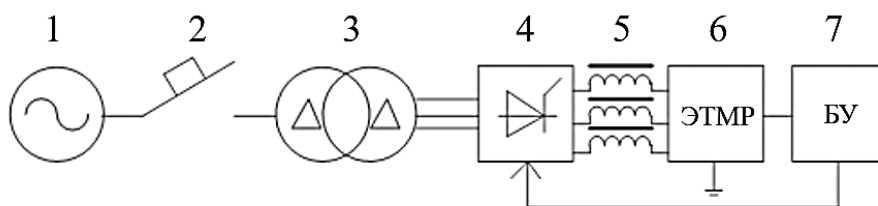


Рисунок 1 – Принципиальная схема источника питания и управления РПТС:

- 1 – источник; 2 – автоматический выключатель; 3 – развязывающий трансформатор 380/380В;
- 4 – тиристорный выпрямитель постоянного тока; 5 – серийные обмотки; 6 – реактор плазменный трехфазный серийный; 7 – блок управления

С помощью РПТС возможно получать расплавы из золошлаков ТЭС, базальтовых пород [3] и другого вида сырья, имеющего температуру плавления примерно равную 1200–1300 °С, также для получения каменного литья и теплоизоляционных материалов из минерального волокна [4]. Несмотря на все плюсы данной установки, стоит учитывать электромагнитную совместимость и уровень влияния источника питания на электрическую сеть, для соблюдения норм качества электрической энергии. Для того чтобы проанализировать влияние данной установки, был проведен опыт по плавке базальта.

Целью данной работы является анализ электромагнитной совместимости РПТС с питающей сетью, возможности проектирования установки большей мощности [5], пригодной для промышленного производства.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является установка – реактор плазменный трехфазный серийный, выполненный на базе патента на изобретение [2]. Подключенный к электрической сети напряжением 380 В, начальный ток устанавливается 50 А [5], при данных значениях тока и напряжения происходит запуск и начало плавления. В течение 5–7 мин ток достигает 50 А, напряжение 220–240 В, следующие 20 мин работа реактора происходит в этом режиме. После необходимо увеличение тока на 20–30 А каждые 10 мин, снятие параметров напряжения и тока в реакторе осуществляется с вольтметров и амперметров, установленных на блоке управления РПТС. Так же осуществляется перемешивание расплава, на полностью обесточенном источнике, с последующим его запуском после перемешивания. Охлаждение установки выполнено при помощи протекания воды через охлаждающие секции реактора.

Для определения характеристик РПТС замеры производились с помощью прибора «Энергомонитор ЭМ 3.2Т1» [6]. В ходе эксперимента были получены действующие значения напряжения и тока; активная, реактивная и полная мощность. Коммутация прибора производилась на вход и выход тиристорного источника питания [7].

Результаты и их обсуждение

На рисунке 2 изображен график изменения суммарных активной, реактивной и полной мощности РПТС, потребляемой в ходе всего эксперимента.

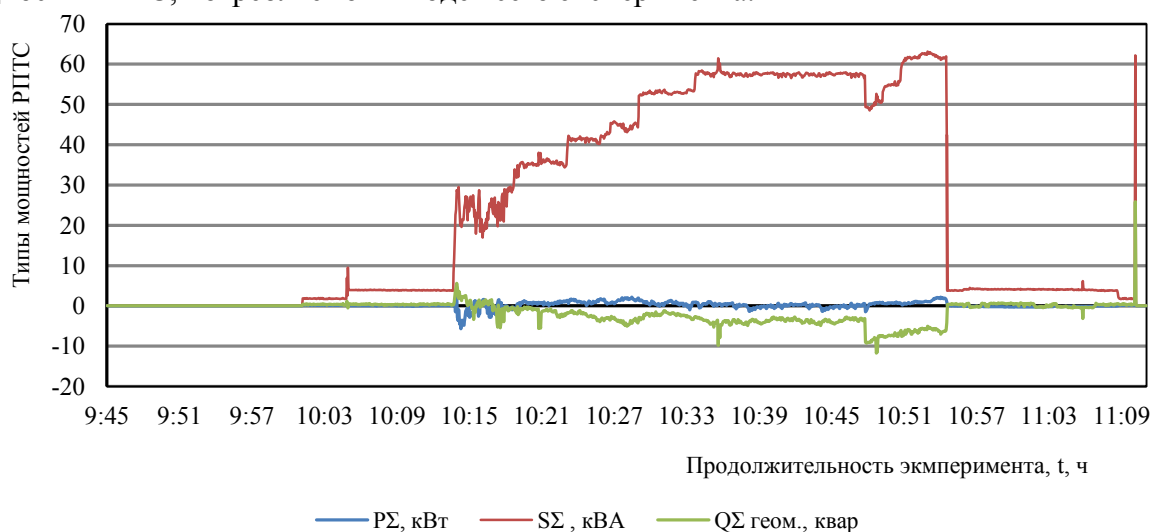


Рисунок 2 – Изменение активной, реактивной и полной мощности в процессе эксперимента:
 P_{Σ} – суммарная активная мощность; Q_{Σ} – суммарная реактивная мощность;
 S_{Σ} – суммарная полная мощность

Из данного графика видно, что активная мощность находилась в пределах от – 1,5023 до 0,6263 кВт, реактивная мощность находилась в пределах от 5,5695 кВА до – 8,9903 кВА и почти на всем протяжении эксперимента отдавалась в сеть, суммарная полная мощность находилась в пределах от 22,6328 до 61,4735 геом. квар. Это указывает на необходимость установки фильтрокомпенсирующего устройства [8].

Можно выделить несколько режимов работы:

- пуск, момент времени 10:13–10:19;
- выход на режим плавки 10:19–10:23;
- рабочий режим – плавка 10:23–10:46 и 10:49–10:54;
- слив – окончание плавки 10:54–11:10.

Также следует отметить, что до включения РПТС и после нагрузкой являлись вытяжной двигатель и двигатель, разбрызгивающий полученный расплав.

Рассмотрим каждый режим работы более детально.

В процессе пуска РПТС было замечено увеличенное потребление активной мощности, что показано на рисунке 3.

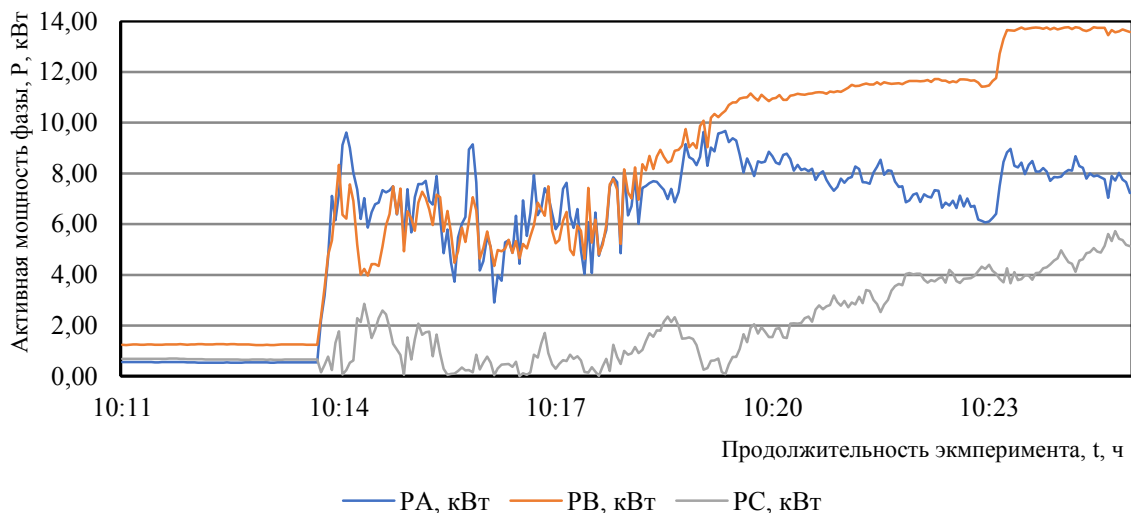


Рисунок 3 – Изменение активной мощности фаз А, В, С в момент пуска и на этапе выхода на режим плавки: PA – активная мощность фазы А; PB – активная мощность фазы В; PC – активная мощность фазы С

Параметры фиксировались каждые 3 с. Запуск длился примерно 6 мин с постепенным увеличением мощности. После этого значение активной мощности постепенно росло, и установка перешла в следующий режим работы.

Следующий этап – выход на рабочий режим 10:19–10:54. На данном графике (рис. 4) видно, что активная мощность увеличивалась до окончания плавки.

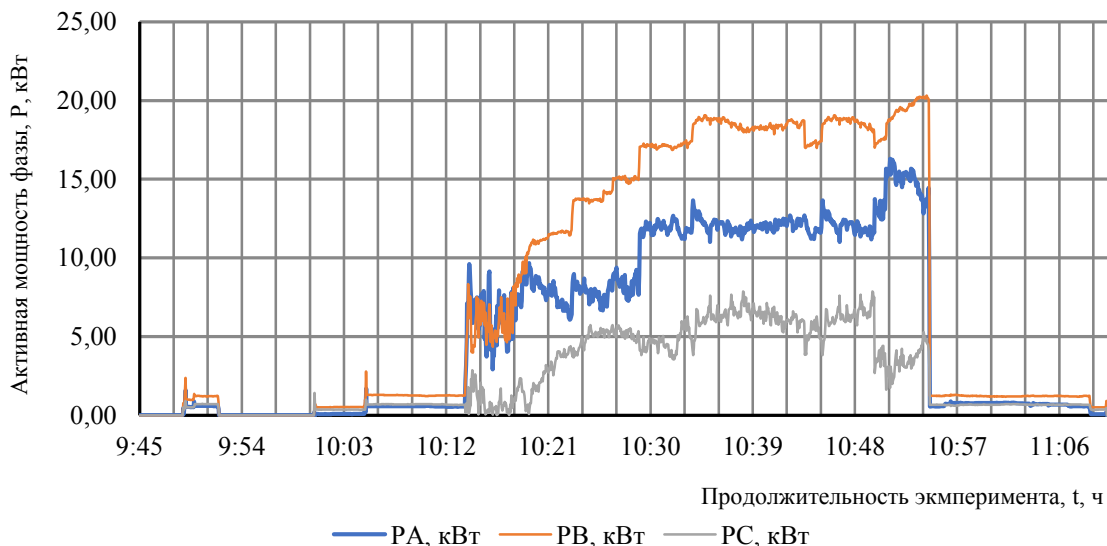


Рисунок 4 – Активная мощность фаз А, В и С в рабочем режиме: PA – активная мощность фазы А; PB – активная мощность фазы В; PC – активная мощность фазы С

В таблице 1 приведены значения параметров установки и загруженности электросети в момент 10:25.

Таблица 1

Значения параметров установки в установившемся режиме (время 10:25)

Фаза	P, кВт	Q, квар	S, кВА	I, А	Kp
A	7,7378	-11,0876	13,5246	61,0340	-0,575684L
B	13,6699	-4,0469	14,2569	62,4317	0,958008L
C	5,1368	12,6255	13,6347	61,7958	-0,380127L
Итого	26,05445	-2,509	41,6347	61,7538	0,002197L

Из таблицы 1 можно сделать вывод, что коэффициент мощности в данный момент 10:25 равен 0,002197, что свидетельствует о том, что этот режим являлся несинусоидальным [9] для электросети и реактивная мощность отдавалась в сеть.

Влияние РПТС на качество электроэнергии.

Изменение напряжения по фазам показаны на рисунке 5, и их значения представлены в таблице 2.

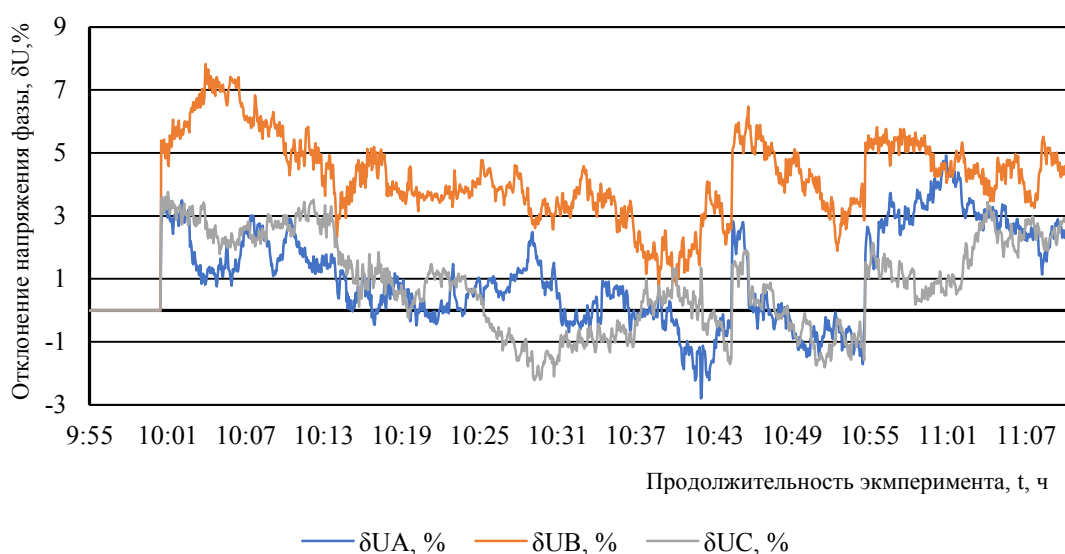


Рисунок 5 – Отклонение напряжения фаз А, В и С в процессе эксперимента:
 δU_A – отклонение напряжения фазы А; δU_B – отклонение напряжения фазы В;
 δU_C – отклонение напряжения фазы С

Таблица 2

Максимальные значения изменения напряжения для нескольких режимов работы установки

Отклонение напряжения фазы, %	Исходный параметр	Пуск	Выход на рабочий режим	Плавка	Слив	Последующий параметр
δU_a	3,0505	3,0833	-0,1826	-1,0297	2,5908	2,3786
δU_b	5,1285	5,94	4,6918	5,2196	4,6723	4,9322
δU_c	3,4474	3,4742	1,4497	-0,302	2,4762	2,3566

Согласно требованиям [10], отклонение напряжения не должно превышать $\pm 10\%$ от номинального. До запуска РПТС и после отключения установки значение напряжения не превышало нормы.

На фазах А и С в момент пуска РПТС можно увидеть небольшое снижение напряжения до 3 %. При выходе на рабочий режим, видим изменение напряжения: на фазе В выросло до 5 %, на фазе А и С стало меньше на 1,5 и -0,2 % соответственно. В остальных режимах плавки отклонение напряжения не превышало допустимых.

На рисунке 6 приведен график изменения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной и нулевой последовательностям.

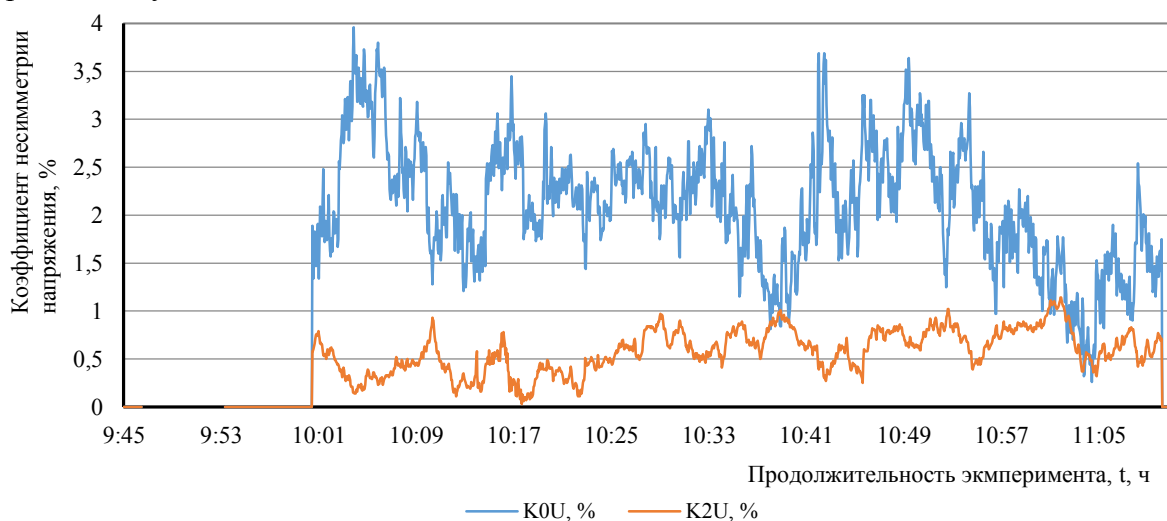


Рисунок 6 – Изменение коэффициента несимметрии напряжения:

K_{2U} – коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности; K_{0U} – коэффициент несимметрии напряжения по нулевой последовательности

Согласно требованиям [10], за промежуток 95 % времени значение коэффициентов несимметрии не должны превышать 2 %, а за весь промежуток времени – 4 %. На протяжении всего эксперимента значение K_{2U} не превышало 0,94 %, а значение K_{0U} – 3,96 %. Из чего можно сделать вывод, что значения коэффициента напряжения по обратной и нулевой последовательности находятся в допустимых пределах.

На рисунке 7 приведен график изменения коэффициента искажения напряжения по фазам.

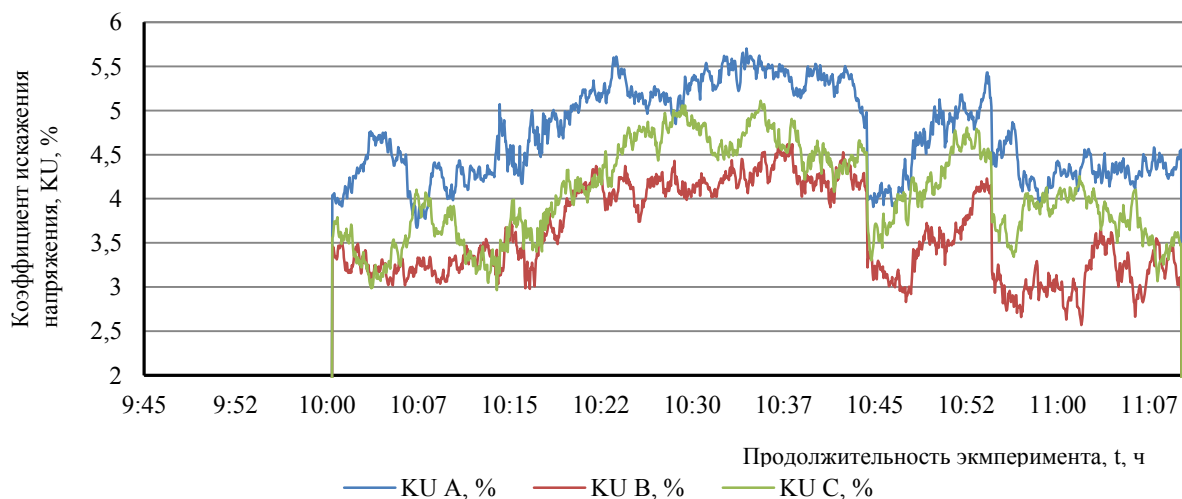


Рисунок 7 – Изменение коэффициента искажения напряжения:

K_{UA} – коэффициент несимметрии напряжения фазы А; K_{UB} – коэффициент несимметрии напряжения фазы В; K_{UC} – коэффициент несимметрии напряжения фазы С

Согласно нормам [10] для сети потребителя с напряжением 380 В искажение напряжения варьируется в диапазоне от 8 до 12 %. В режиме плавки наблюдались наибольшие значения коэффициента искажения напряжения. Они могут варьироваться от 2,777 до 5,585 %, что

является нормой [11], из чего можно сделать вывод, что показания коэффициента несимметрии напряжения находились в допустимых пределах [12].

На рисунке 8 представлено изменение искажения тока в фазах А, В, С в период всего эксперимента.

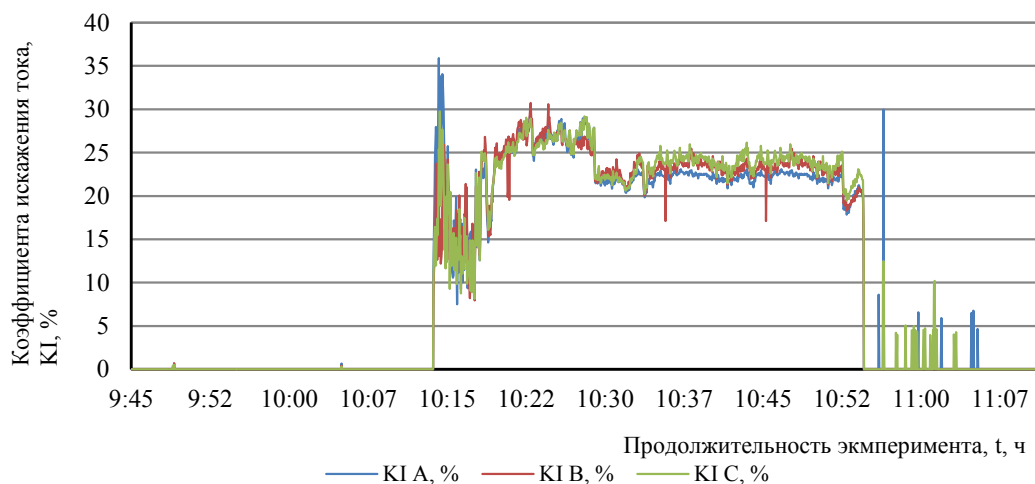


Рисунок 8 – Коэффициенты искажения тока:

KI A – коэффициент несимметрии тока фазы А; KI B – коэффициент несимметрии тока фазы В; KI C – коэффициент несимметрии тока фазы С

В рабочем режиме коэффициент искажения тока в фазах не превышает 30 %, согласно требованиям [13], что свидетельствует о том, что РПТС пригоден для промышленного применения. Рассмотрим в таблице 3 значения гармонических составляющих тока, вызывающих несимметрию.

Таблица 3

Коэффициенты нечетных гармоник напряжения и тока фаз, в момент выхода на режим для времени 10:19

Коэффициент искажения напряжения, %	Напряжение				Токи			
	фаза А	фаза В	фаза С	предельно допустимые значения	Коэффициент искажения тока, %	фаза А	фаза В	фаза С
KU (3)	5,542	4,608	4,302	2,25	KI (3)	4,124	2,58	6,267
KU (5)	4,05	3,144	3,506	2,25	KI (5)	25,528	24,275	25,31
KU (7)	4,122	2,014	3,2	1,5	KI (7)	9,827	10,289	11,935
KU (9)	3,444	2,12	2,756	0,6	KI (9)	2,361	0,531	2,762
KU (11)	3,702	1,704	4,3	1,5	KI (11)	12,735	10,254	11,351
KU (13)	3,112	1,892	2,017	1,05	KI (13)	3,352	4,518	5,202
KU (15)	2,328	1,562	2,76	0,3	KI (15)	1,831	0,41	2,174
KU	5,789	5,302	5,251	-	KI (СКГС)	27,331	26,448	25,739

Для момента 10:19 все значения нечетных гармонических составляющих напряжения и тока в фазах превышали допустимые значения [14]. Из чего можно сделать вывод, что наибольшее значение KU соответствовало 3-й гармонике (от 4,302 до 5,542 % при норме 2,25 %) [14]. Наибольшее значение KI соответствовало 5-й гармонике (от 24,275 до 25,528 %). С результатами исследований энергозатрат на плавление базальта Енхорского месторождения можно ознакомиться в работе [15].

Заключение

В ходе эксперимента по плавке базальтовой крошки были получены следующие энергетические характеристики экспериментальной установки – реактор плазменный трехфазный серийный: $P(t)$, $Q(t)$, $S(t)$, $I(t)$ и $U(t)$. Суммарная полная, активная и реактивная мощность за весь промежуток работы установки была в пределах нормативных значений, которые имели следующие значения: $P_{\Sigma}=237,125$ кВт, $Q_{\Sigma} = -071,9144$ геом. квар., $S_{\Sigma}=40840,3476$ кВА. Из этого можно сделать вывод, что РПТС является активно-индуктивной нагрузкой для сети.

Можно отметить, что показатели несинусоидальности напряжения находились в пределах от 2,777 до 5,585 %, а показатели несинусоидальности тока не выходили за рамки 30 %. Из этого можно сделать вывод, что увеличение мощности РПТС, возможно, и не будет оказывать существенного влияния на питающую сеть.

По данным, полученным в ходе эксперимента, о качестве потребляемой установкой электроэнергии, будет осуществлен расчет и подбор параметров защитного и регулировочного оборудования РПТС, а также сетевых фильтров.

Библиография

1. Широков О.Г., Алфёрова Т.В., Рудченко Ю.А. и др. Влияние электротермического оборудования на качество электроэнергии в системе электроснабжения промышленных предприятий // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2021. – № 4 (87). – С. 90–99.
2. Патент № 2533565 С1 Российская Федерация, МПК С03В 37/06. Плазменный способ получения минеральной ваты и установка для его осуществления // Буянтуев С.Л., Шишулькин С.Ю. Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления»: – Заявл. 07.11.2013; опубл. 20.11.2014ю – Бюл. № 32.
3. Buratti C., Moretti E., Belloni E. et al. Thermal and acoustic performance evaluation of new basalt fiber insulation panels for buildings // Energy Procedia – 2015. – Vol. 78. – P. 303–308.
4. Буянтуев С.Л., Баташов А.И., Зонхоев Г.Б. и др. Исследование энергетических характеристик экспериментальной установки электромагнитный технологический реактор // Вестник ВСГУТУ. – 2016. – № 5 (62). – С. 11–18.
5. ГОСТ 30804.3.12-2013 Совместимость технических средств, электромагнитная нормы гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным распределительным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293775/4293775955.pdf> (дата обращения: 11.08.2024). – Текст: электронный.
6. Приборы для измерений электроэнергетических величин и показателей качества электрической энергии «Энергомонитор – 3.3Т1». Руководство по эксплуатации МС3.055.028 РЭ. – URL: https://www.electronpribor.ru/files/products/rukovodstvo-po-ekspluatatsii-33t_7.pdf (дата обращения: 11.08.2024). – Текст: электронный.
7. Шакиров М.А., Ткачук А.А. Инновационные решения в теории трансформатора // Бюллетень результатов научных исследований. – 2021. – № 2. – С. 5–31.
8. Табаров, Б.Д., Соловьев В.А., Сериков А.В. Система стабилизации напряжения потребителей при нестабильности питающего напряжения и колебаниях тока нагрузки // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Серия: Энергетика. – 2023. – Т. 23, № 3. – С. 41–50.
9. Сычев Ю.А., Ковальчук М.С., Кривенко А.В. и др. К вопросу о способе определения коэффициента мощности при несинусоидальных режимах // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2021. – № 5. – С. 473–482.
10. ГОСТ 32144-2013 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения: 11.08.2024). – Текст: электронный.
11. ГОСТ 30372-95 Совместимость технических средств электромагнитная. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200015869> (дата обращения: 11.08.2024). – Текст: электронный.
12. Borisova E., Amurova N., Kodirov F. et al. Modelling and research of harmonic components of current and voltage in electric nets // Universum: технические науки. – 2022. – № 2–7 (95). – С. 63–65.

13. Юндин М.А., Жариков Д.Т., Пономаренко Т.З. О влиянии несимметрии и несинусоидальности токов на потери электроэнергии в силовом трансформаторе // *Агротехника и энергообеспечение*. – 2021. – № 4 (33). – С. 114–118.

14. Kostinskiy S.S. Review and results of studies of the harmonic composition of the current consumed by low-power frequency converters, as well as methods and devices to reduce their negative impact on power supply systems // *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2020. – Vol. 22, N 2. – P. 27–42.

15. Шишкулькин С.Ю., Чан Ф.Л., Старинский И.В. и др. Энергозатраты процесса плавления базальта Энхорского месторождения // *Вестник ВСГУТУ*. – 2024. – № 3 (94). – С. 109–117.

Bibliography

1. Shirokov O.G., Alfyerova T.V., Rudchenko Yu.A. et al. Influence of electrothermal equipment on electric power quality in power supply system of industrial enterprises // *Bulletin Sukhoi State Technical University*. – 2021. – N 4 (87). – P. 90–99.

2. Patent N 2533565 C1 Russian Federation, IPC C03B 37/06. Plasma method for producing mineral wool and installation for its implementation // Buyantuev S.L., Shishulkin S.Yu. Patent holder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «East Siberian State University of Technology and Management». – Applied 07.11.2013; published 20.11.2014. – Bulletin N 32.

3. Buratti C., Moretti E., Belloni E. et al. Thermal and acoustic performance evaluation of new basalt fiber insulation panels for buildings // *Energy Procedia*. – 2015. – Vol. 78. – P. 303–308.

4. Buyantuev S.L., Batashov A.I., Zonkhoev G.B. et al. The research of «the electromagnetic technological reactor» power characteristics // *ESSUTM Bulletin*. – 2016. – N 5 (62). – P. 11–18.

5. GOST 30804.3.12-2013 Compatibility of technical equipment, electromagnetic standards of harmonic components of current generated by technical equipment with a consumed current of more than 16 A, not more than 75 A (in one phase), connected to low-voltage distribution power supply systems. Standards and test methods. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293775/4293775955.pdf> (access date: 11.08.2024). – Text: electronic.

6. Devices for measuring electric power quantities and electric power quality indicators "Energomonitor – 3.3T1". Operating manual MS3.055.028 RE. – URL: https://www.electronpribor.ru/files/products/rukovodstvo-po-ekspluatatsii-33t_7.pdf (access date: 11.08.2024). – Text: electronic.

7. Shakirov M.A., Tkachuk A.A. Innovative solutions in transformer theory // *Bulletin of scientific research results*. – 2021. – N 2. – P. 5–31.

8. Tabarov, B.D., Solovyev V.A., Serikov A.V. Consumer voltage stabilization system in case of supply voltage instability and load current fluctuations // *Bulletin of the South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2023. – Vol. 23, N 3. – P. 41–50.

9. Sychev Yu.A., Kovalchuk M.S., Krivenko A.V. et al. Method for determining power factor in non-sinusoidal modes // *Izvestiya TulGU. Technical sciences*. – 2021. – N 5. – P. 473–482.

10. GOST 32144-2013 Quality standards for electrical energy in general-purpose power supply systems. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301> (access date: 11.08.2024). – Text: electronic.

11. GOST 30372-95 Electromagnetic compatibility of technical equipment. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200015869> (access date: 11.08.2024).

12. Borisova E., Amurova N., Kodirov F. et al. Modelling and research of harmonic components of current and voltage in electric nets // *Universum: technical sciences*. – 2022. – N 2–7 (95). – P. 63–65.

13. Yundin M.A., Zharikov D.T., Ponomarenko T.Z. Influence of asymmetry and non-sinusoidality of currents on energy losses in a power transformer // *Agrotechnics and energy supply*. – 2021. – N 4 (33). – P. 114–118.

14. Kostinskiy S.S. Review and results of studies of the harmonic composition of the current consumed by low-power frequency converters, as well as methods and devices to reduce their negative impact on power supply systems // *Power engineering: research, equipment, technology*. – 2020; – Vol. 22, N 2. – P. 27–42.

15. Shishulkin S.Yu., Chan F.L., Starinsky I.V. et al. Energy costs of the melting process of basalt of the Enkhorskoye deposit // *ESSUTM Bulletin*. – 2024. – N 3 (94). – P. 109–117.

**ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ
ДЛЯ ЖУРНАЛА «ВЕСТНИК ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНОЛОГИЙ И УПРАВЛЕНИЯ» (ВЕСТНИК ВСГУТУ)**

Статья представляется в виде файла в электронном виде формата *.doc на электронный адрес vestnikvsgutu@mail.ru. Объем статьи должен быть не менее 8 полных страниц (включая таблицы, рисунки и список литературы) в формате MSWORD 6.0/95, MSWORD 97, MSWORD 2000 (шрифт TimesNewRoman, 12 пт. через один интервал, поля: верхнее 2 см, левое 2 см, правое 2 см, нижнее 2 см, ориентация – книжная, перенос слов автоматический). Абзацный отступ – 1,25 см. В начале статьи необходимо указать раздел, в который следует поместить статью, и сведения об авторах, включающие фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, академическое звание, наименование организации, E-mail, факс (если имеется), индекс статьи по Универсальной десятичной классификации (УДК), название и краткую аннотацию (100 слов) статьи, ключевые слова (6...8 слов). Название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотация, ключевые слова, а также список цитированной литературы (библиография) даются и на английском языке.

Текст статьи должен включать разделы: Введение (обязательно указать цель работы), **Материалы и методы исследования, Результаты исследования и их обсуждение, Заключение, Библиография.** В тексте статьи, описывающем результаты исследования, должны использоваться глаголы в прошедшем времени.

Все формулы, в том числе отдельные переменные, упоминаемые в тексте, должны быть набраны в редакторе формул MicrosoftEquation или MathType. Не допускается набор формул в текстовом режиме или с использованием таблицы символов.

Параметры MicrosoftEquation или MathType должны быть следующими:

Стиль: текста – TimesNewRoman, прямой; функции – TimesNewRoman, наклонный; переменной – TimesNewRoman, наклонный; греческих букв – Symbol, наклонный; символов – Symbol, прямой; чисел – TimesNewRoman, прямой.

Размеры: обычный – 12 pt, крупный индекс – 10 pt, мелкий индекс – 8 pt, крупный символ – 16 pt, мелкий символ – 12 pt.

Размер формул по горизонтали не должен превышать 130 мм, длинные формулы следует обязательно разбивать на блоки. Не рекомендуется применять «многотажные» индексы.

Формулы ставятся по центру, номер формулы ставится у правого края, например:

$$z(\zeta) = z_A + Ke^{i\alpha\zeta} \int_1^{\zeta} \frac{(1-\zeta)d\zeta}{[(\zeta+c) \cdot (1+c \cdot \zeta)]^{3/2} \cdot \zeta^\alpha} \quad (1)$$

Нумеруются лишь те формулы, на которые в тексте имеются ссылки.

В таблице необходимо пронумеровать заголовки столбцов. При переносе таблиц на другую страницу пишется «Продолжение таблицы», а вместо головной части таблицы, ставится нумерация столбцов.

Рисунки представлять в электронной версии, выполненные на компьютере, черно-белые или в цвете. Для выполнения рисунков допускается использование графики MSWord. Надписи и обозначения на рисунках должны быть выполнены шрифтом, близким по начертанию шрифтам TimesNewRoman 11pt. Подрисуточные подписи вставлять в рисунок не рекомендуется.

При выборе единиц измерения рекомендуется придерживаться международной системы единиц СИ.

Ссылки в тексте на цитированную литературу даются в квадратных скобках, например [1]. Библиография приводится в конце статьи и входит в общий объем, необходимо указать не менее 15 источников. Ссылка в тексте идет последовательно, по нумерации источников, например [1, 2, 3]. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Не менее 50 % источников из библиографии должны быть опубликованы в периодических печатных изданиях в течение последних десяти лет. Не рекомендуется использование научной литературы старше 20 лет и более трех интернет-источников. Рекомендуется включение в текст статьи ссылок на научные труды иностранных авторов.

При составлении списка литературы (на русском и иностранных языках) обязательно указание следующих данных:

для книг – фамилия и инициалы автора, полное название книги, место издания, издательство, год издания, том или выпуск и общее количество страниц;

для статей в периодических изданиях – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала (сборника), год издания (для сборника – также место издания), том, номер (выпуск), первая и последняя страницы статьи;

для статей в неопубликованных изданиях (книгах) – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название книги (сборника), место издания, издательство, год издания, первая и последняя страницы статьи;

для тезисов и текстов докладов на конференциях (семинарах, симпозиумах) – фамилия и инициалы автора, название доклада, полное название сборника тезисов или трудов конференции, дата и место проведения конференции, том, номер (выпуск), первая и последняя страницы тезисов или текста доклада;

для препринтов – фамилия и инициалы автора, название работы, место (город), год издания, количество страниц, (номер препринта / название научного учреждения или учебного заведения);

для патентов и авторских свидетельств – вид патентного документа, его номер, название страны, выдавшей документ, индекс МКИ, название изобретения, авторы, дата подачи заявки, дата публикации и сведения об официальном издании, где опубликованы сведения о патентном документе, сведения о приоритете;

для депонированных рукописей – фамилия и инициалы автора, полное название рукописи, наименование организации, год издания, общее количество страниц, место депонирования.

Примеры оформления библиографии:

а) для журнальных статей:

Узаков Я.М., Каимбаева Л.А. Использование мяса и субпродуктов маралов в производстве мясных изделий // Мясная индустрия, 2021. – № 8. – С. 40–43.

б) для книг:

Никонов В. И., Яковлева В. Я. Алгоритмы успешного маркетинга. – М., 2020. – С. 256–300.

в) для статей в сборнике:

Абильмажинова Н.К., Абжанова Ш.А., Таева А.М. Исследование качественных показателей мясных полуфабрикатов из конины с использованием // Естественные и технические науки: опыт, проблемы, перспективы: мат-лы конф. – Ставрополь: Центр научного знания «Логос», 2020. – № 1. – С. 3–7.

г) для статей в интернет-изданиях:

Логинова Л. Г. Сущность результата дополнительного образования детей // Образование: исследовано в мире: междунар. науч. пед. интернет-журн. 21.10.2021. URL: <http://www.oim.ru/reader.asp?nomer=366> (дата обращения: 17.04.2022).

д) Патент RU 2427124 C1 A01C 7/20. Сошник / Тумурхонов В.В., Раднаев Д.Н., Лобанов И.Ф., Прокопьев С.Н. Патентообладатели: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова». – Заявка № 2010110214/21, заявл. 27.08.2011, опубл. 17.03.2010.

д) для источников Интернета: полностью название ресурса на языке оригинала.

Отбор, редактирование и рецензирование публикуемых статей производятся редакционной коллегией и ведущими учеными. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Научное издание

ВЕСТНИК
ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
ТЕХНОЛОГИЙ И УПРАВЛЕНИЯ
(Вестник ВСГУТУ)

Научно-технический журнал
№ 4 (95)

Редакторы

Р. А. Багаева

Е. В. Белоplotова

Компьютерная верстка

Е. В. Белоplotовой

Ю. А. Мунхановой

Выход в свет 25.12.2024. Формат 60×84 1/8.
Усл. печ. л. 14,65. Тираж 100 экз. Заказ № 170.
Цена 350 руб.

Издательство ВСГУТУ, редакция «Вестник Восточно-Сибирского
государственного университета технологий и управления» (Вестник ВСГУТУ)
Адрес издательства, редакции: 670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ,
ул. Ключевская, д. 40В, строение 1.
Отпечатано в типографии ВСГУТУ
Адрес типографии: 670013, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ,
ул. Ключевская, д. 40В, строение 9.