



ISSN: 2686-7567

ВЕСТНИК ГГНТУ
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

HERALD OF GSTOU
ENGINEERING SCIENCES

SCIENTIFIC & TECHNICAL JOURNAL

2023

Том XIX

№ 2 (32)

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

д. т. н., профессор Минцаев Магомед Шавалович

Зам. главного редактора – д. т. н., профессор
С-А. Ю. Муртазаев

Ответственный секретарь – д. т. н., доцент
М. Ш. Саламанова

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель – профессор, д. ф.-м. н.
И. А. Керимов (АН ЧР)

д. т. н., профессор, член-корреспондент РАН
Б. А. Григорьев (ВНИИГаз)

д. т. н., профессор Д. С. Реченко (АГНИ)

к. т. н., доцент М. Я. Пашаев (ГГНТУ)

к. т. н., доцент М. С. Сайдумов (ГГНТУ)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Строительство. Архитектура

д. т. н., профессор Д. К-С. Батаев

д. т. н., профессор Г. Н. Хаджишалапов

д. т. н., доцент И. Г. Гайрабеков

д. т. н., профессор Х. Н. Мажиев

канд. архитектуры, доцент Ш. А. Насуханов

д. т. н., профессор Т. А. Хежев

Химическая технология

д. т. н., доцент С. П. Иванов

д. т. н., профессор Л. Ш. Махмудова

д. х. н. Х. М. Кадиев

д. т. н., профессор Х. Х. Ахмадова

д. т. н., профессор О. Н. Каратун

д. х. н., профессор Э. А. Александрова

к. т. н., доцент А. А. Эльмурзаев

Информатика, вычислительная техника и управление

д. п. н., профессор Э. Д. Алисултанова

д. т. н., доцент И. Н. Ажмухамедов

д. т. н., профессор А. В. Илюхин

к. т. н. М. Р. Исаева

д. т. н., профессор В. И. Марсов

д. т. н., профессор К. Е. Румянцев

д. т. н., профессор А. Л. Рутковский

д. т. н., профессор Е. А. Хадзарагова

к. т. н., доцент И. В. Хасамбиев

д. т. н. М. А. Хажмурадов

к. т. н. З. Л. Хакимов

EDITOR – IN-CHIEF

Magomed Mintsaeв, Doctor in Engineering

Associate Editor – Said-Alvi Murtazaev, Doctor
in Engineering

Executive Secretary – Madina Salamanova, Doctor
in Engineering

EDITORIAL COUNCIL

Chairman – Ibragim Kerimov, Doctor in Physics
and Mathematics

Boris Grigoryev, corresponding member of RAS,
Doctor in Engineering

Rechenko Denis, Doctor in Engineering

Magomed Pashaev, Phd in Engineering

Magomed Saidumov, Phd in Engineering

EDITORIAL BOARD

Construction. Architecture

Dena Bataev, Doctor in Engineering

Khadzhishalapov Gadzhimagomed, Doctor in Engineering

Ibragim Gayrabekov, Doctor in Engineering

Khasan Mazhiev, Doctor in Engineering

Shadid Nasukhanov, PhD in Architecture

Tolya Khezhev, Doctor in Engineering

Chemical Technology

Serguey Ivanov, Doctor in Engineering

Lyubov Makmudova, Doctor in Engineering

Khusain Kadiev, Doctor in Chemistry

Khava Akhmadova, Doctor in Engineering

Olga Karatun, Doctor in Engineering

Elvira Alexandrova, Doctor in Chemistry

Ayub Elmurzaev, PhD in Engineering

Computer Science, Computer Engineering and Management

Esmira Alisultanova, Doctor in Pedagogics

Iskandar Azhmukhamedov, Doctor in Engineering

Madina Isaeva, PhD in Engineering

Andrey Ilyukhin, Doctor in Engineering

Vadim Marsov, Doctor in Engineering

Konstantin Rumyantsev, Doctor in Engineering

Alexander Rutkovsky, Doctor in Engineering

Elena Khadzaragova, Doctor in Engineering

Manap Khazhmuradov, Doctor in Engineering

Ibragim Khasambiev, PhD in Engineering

Zaur Khakimov, PhD in Engineering

Учредитель: ФГБОУ ВО

«Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова»

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК Российской Федерации (с 15.02.2022 г.), в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), доступный в интернете, по адресу <http://www.elibrary.ru> (Научная электронная библиотека).

Подписной индекс АО «Почта России» ПА 753

Адрес редакции/издателя:

364024, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100

Тел./факс: (8712) 29-59-3263

<http://gstou.ru/science/ggntu-works.php>

e-mail: trudy-ggntu@mail.ru

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и за использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации. Редакция может опубликовать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора. Перепечатка и воспроизведение статей, рекламных и иллюстративных материалов возможны лишь с письменного разрешения главного редактора. Редакция не несет ответственности за содержание рекламы и объявлений.

© ФГБОУ ВО Грозненский государственный нефтяной технический университет
им. академика М.Д. Миллионщикова, 2023

© Редакционная коллегия

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Гайрабеков И.Г., Моисеенко Н.А., Гагаев Р.Х. Дрейф-компенсация инерциальных датчиков. Новые методы на основе глубокого обучения	5
Кожевников А.А. Разработка микропроцессорной системы управления напольным оборудованием учебного стенда	14
Минцаев М.Ш., Алисултанова Э.Д., Мидаева А.А. Исследование и разработка автоматизированной информационной системы для учета самозанятых студентов	25
Садулаев А.А-В., Исаева М.Р., Хакимов З.Л., Муртазова Х.Т. Проектирование автоматизированной системы управления параметрами микроклимата помещения пекарни	32

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Александрова Э.А., Александров Б.Л., Хадисова Ж.Т., Магомадова М.Х. Водно-парафиновые дисперсии	39
Зароченцев В.М., Рутковский А.Л., Болотаева И.И. Блочное-модульное моделирование термодинамики и кинетики физико-химических превращений	49
Уздиева Н.С., Нурадинов А.С., Ахтаев С.С-С., Исаева М.Р. Влияние нерастворимых примесей и вибрации на кристаллизационные процессы в расплавах металлов	57
Рутковский А.Л., Бахтеев Э.М., Бутов Х.А. Моделирование процесса формирования титановых окатышей в барабанном окомкователе	66

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Батаев Д.К-С., Муртазаев С-А.Ю., Батаева П.Д., Батаев А.Д. Концепция ремонтно-реставрационных вяжущих и составов	74
Кокоев М.Н., Федоров В.Т. Выбор геотермальных месторождений для производства строительных материалов	85
Саламанова М.Ш., Бисултанов Р.Г., Мовсулов М.М. Перспективные возможности получения качественных мелкозернистых композитов	94

CONTENTS

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

I.G. Gairabekov, N.A. Moiseenko, R.Kh. Gagaev Drift-compensation of inertial sensors. New deep learning-based methods	5
A.A. Kozhevnikov Development of a microprocessor control system for the floor equipment of the training stand	14
Mintshev M.Sh., Alisultanova E.D., Midaeva A.A. Research and development of an automated information system for accounting self- employed students	25
A.A-V. Sadulaev, M.R. Isaeva, Z.L.Khakimov, Kh.T. Murtazova Design of an automated control system for the parameters of the microclimate of the bakery premises	32

CHEMICAL TECHNOLOGIES

E.A. Alexandrova, B.L. Alexandrov, Zh.T. Khadisova, M.Kh. Magomadova Water-paraffin dispersions	39
V.M. Zarochentsev, A.L. Rutkovskiy, I.I. Bolotaeva Block-modular modeling of thermodynamics and kinetics of physico-chemical transformations	49
N.S. Uzdieva, A.S. Nuradinov, S.S-S. Akhtaev, M.R. Isaeva Effect of insoluble impurities and vibration on crystallization processes in metal melts	57
A.L. Rutkovskiy, E.M. Bakhteev, Kh.A. Butov Simulation of the process of formation of titanium pellets in a drum pelletizer	66

CONSTRUCTION. ARCHITECTURE

D.K-S. Bataev, S.-A.Y. Murtazaev, P.D. Bataeva, A.D. Bataev The concept of new repair and restoration binders and compositions	74
M.N. Kokoev, V.T. Fedorov Selection of geothermal energy sources to power production of building materials	85
M.Sh. Salamanova, R.G. Bisultanov, M.M. Movsulov Opportunities for producing high-quality fine-grain composites	94

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 004.896.8

DOI: 10.26200/GSTOU.2023.78.94.001

**ДРЕЙФ-КОМПЕНСАЦИЯ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ.
НОВЫЕ МЕТОДЫ НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ**

© И.Г. Гайрабеков, Н.А. Моисеенко, Р.Х. Гагаев
ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

В данной статье рассматриваются новые методы дрейф-компенсации инерциальных датчиков на основе глубокого обучения. Описываются основные проблемы, связанные с дрейфом инерциальных датчиков, и приводятся примеры инерциальных датчиков, которые могут использоваться в различных областях, таких как автомобильная промышленность, авиация и космические технологии.

Навигация на основе инерционных датчиков, т.е. акселерометров и гироскопов, в последние годы значительно выросла. Однако шум средних и дешевых датчиков приводит к высокой погрешности в оценке ориентации, особенно в угле рысканья. Использование инерциальных средств измерения ускорения (акселерометр), направления (гироскоп, магнитометр), датчик давления (высота над уровнем моря) для вычисления скорости, расстояния и высоты, и методы, применяемые для их вычислений (двойное интегрирование данных акселерометра, для вычисления пройденного расстояния например), выявляет дрейф – небольшие ошибки в измерении ускорения и угловой скорости интегрируются во все более крупные ошибки в скорости, которые усугубляются еще большими ошибками в определении положения в пространстве. Дрейф связан с тем, что сама скорость не является нулевым средним сигналом. Для его исправления существует немного вариантов. Либо датчики должны иметь беспрецедентную точность, это означает, что цена такой системы возрастает в разы и аппарат, использующий эту систему, становится громоздким, или можно профилировать паттерны ошибок и составить шаблоны для исправления дрейфа, что является программным подходом к решению проблемы.

Ключевые слова: Инерциальные датчики (IMU), дрейф-компенсация, глубокое обучение (Deep Learning), нейронные сети (Neural Networks), алгоритмы фильтрация (Kalman filter), сигнальная обработка, слияние данных (Sensor Fusion), компьютерное зрение.

Формат цитирования: Гайрабеков И.Г., Моисеенко Н.А., Гагаев Р.Х. Дрейф-компенсация инерциальных датчиков. Новые методы на основе глубокого обучения // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XIX, №2. 2023. С.5-13. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.78.94.001

Компенсация дрейфа инерциальных датчиков является активно исследуемой проблемой в инженерии и науке по нескольким причинам.

Инерциальные датчики, такие как акселерометры, гироскопы и магнитометры, широко используются в различных приложениях, таких как беспилотные летательные аппараты, автономные транспортные средства, умные часы и т.д. Эти датчики позволяют измерять различные параметры, такие как ускорение,

угловую скорость и магнитное поле, которые необходимы для контроля движения объекта. Однако эти датчики имеют тенденцию накапливать ошибки, что приводит к дрейфу и погрешности измерений.

Дрейф инерциальных датчиков может стать еще более проблематичным при использовании их в системах, которые требуют высокой точности, например, в авиационной и космической промышленности, медицинских

устройствах и т.д. Накопление ошибок в измерениях может привести к серьезным последствиям и опасностям для жизни и здоровья людей.

Компенсация дрейфа инерциальных датчиков является ключевым шагом в разработке более точных и надежных систем автоматического управления, таких как беспилотные автомобили и беспилотные летательные аппараты. Без коррекции дрейфа датчиков такие системы могут стать непредсказуемыми и неспособными к правильному функционированию [1-3].

Таким образом, компенсация дрейфа инерциальных датчиков является важной проблемой в инженерии и науке, так как позволяет повысить точность и надежность измерений, улучшить работу систем автоматического управления и обеспечить безопасность в различных областях применения [15].

Существует несколько подходов к компенсации дрейфа инерциальных датчиков, включая классические методы, такие как калибровка и фильтрация, а также новые методы на основе глубокого обучения.

Калибровка – это процесс определения параметров датчиков, которые могут привести к дрейфу. Этот процесс включает в себя измерение датчиков в нескольких положениях и ори-

ентациях, а затем использование этих данных для вычисления параметров калибровки. Калибровка может быть выполнена как в процессе производства датчиков, так и во время эксплуатации системы [4].

Фильтрация – это процесс обработки данных из датчиков, чтобы уменьшить дрейф и другие ошибки в измерениях. Один из наиболее распространенных подходов – это Калманов фильтр, который использует модель системы и измерения датчиков для определения состояния системы с минимальной ошибкой. Другие подходы включают расширенный Калманов фильтр, фильтр Монте-Карло и другие алгоритмы фильтрации [5].

Недавно, с появлением глубокого обучения, появились новые методы компенсации дрейфа датчиков, основанные на использовании нейронных сетей и других алгоритмов машинного обучения. Эти методы включают в себя глубокие нейронные сети, автоэнкодеры и другие модели машинного обучения, которые могут обучаться на больших объемах данных, чтобы предсказывать и компенсировать дрейф датчиков. Некоторые из этих методов также позволяют учитывать внешние факторы, такие как температура и влажность, которые могут влиять на работу датчиков [6].

Модель инерциального измерительного модуля

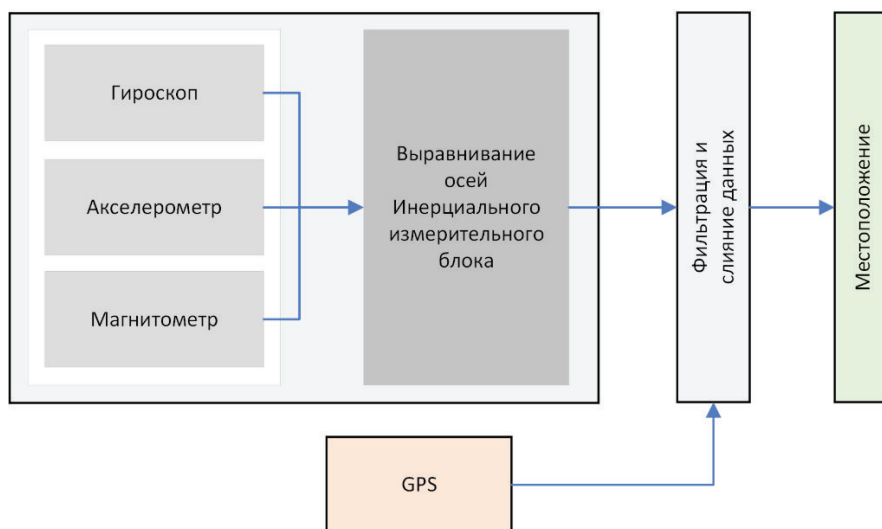


Рис. 1. Модуль реализации на основе инерциальных датчиков

Стоит отметить, что механическая компенсация дрейфа может включать в себя использование дополнительных датчиков, таких как магнитометры или барометры, для уточнения показаний инерциальных датчиков. Однако этот подход может быть затратным и сложным в реализации.

Программная компенсация, с другой стороны, может быть более простой и эффективной, особенно с использованием новых методов глубокого обучения. Однако такие методы могут потребовать больших объемов данных для обучения и вычислительных ресурсов для обработки.

Несмотря на то, что все эти подходы могут быть эффективными для компенсации дрейфа датчиков, каждый из них имеет свои преимущества и ограничения, которые должны быть учтены при выборе оптимального метода для конкретной системы.

В конечном итоге выбор подхода к компенсации дрейфа инерциальных датчиков будет зависеть от конкретных требований и ограничений системы, а также от доступных ресурсов и экономических факторов [7].

В настоящее время глубокое обучение становится все более распространенным подходом для компенсации дрейфа инерциальных датчиков. Это обусловлено тем, что глубокие нейронные сети и другие алгоритмы машинного обучения могут обучаться на больших объемах данных для предсказания и компенсации дрейфа датчиков, что делает их перспективными в этой области. Глубокое обучение позволяет создавать более точные модели компенсации дрейфа, основанные на анализе большого количества данных, и может использоваться для обработки нескольких типов датчиков, что позволяет создавать более точные модели компенсации дрейфа. Одним из важных пре-

имуществ этих методов является их эффективность в решении данной задачи. Глубокие нейронные сети, автоэнкодеры (autoencoder) и другие модели машинного обучения входят в список новых методов компенсации дрейфа инерциальных датчиков, основанных на глубоком обучении.

Автоэнкодеры представляют собой нейронные сети, которые обучаются на данных входа, чтобы создать более компактное представление этой информации, которое может быть использовано для восстановления исходных данных. В контексте компенсации дрейфа датчиков автоэнкодеры могут использоваться для создания модели, которая прогнозирует дрейф датчиков на основе данных входа. После этого прогнозы могут быть использованы для компенсации дрейфа. Таким образом, автоэнкодеры позволяют извлекать признаки из данных датчиков и обучать модели, которые компенсируют дрейф [6].

В случае использования глубоких нейронных сетей нейронная сеть обучается на исторических данных датчиков и их измерениях, чтобы предсказывать изменения состояний системы в будущем. Эти предсказания могут быть использованы для компенсации дрейфа датчиков и обеспечения более точных измерений.

Одной из наиболее популярных архитектур нейронных сетей для компенсации дрейфа является рекуррентная нейронная сеть (RNN). Эта архитектура позволяет обрабатывать последовательные данные и учитывать предыдущее состояние системы при вычислении нового состояния. В частности, LSTM (Long Short-Term Memory) является популярным типом RNN, который может обрабатывать последовательности произвольной длины и сохранять долгосрочную зависимость между данными [8].

Таблица с результатами измерений до и после применения методов дрейф-компенсации на инерциальных датчиках:

Датчик	Характеристики	Дрейф до (град/час)	Дрейф после (град/час)	Длительность измерений (час)
IMU 1	MEMS, 3 оси	1.2	0.05	10
IMU 2	FOG, 2 оси	0.8	0.06	5
IMU 3	MEMS, 6 осей	2.1	0.2	24

Существуют различные методы обучения, которые могут быть использованы для обучения моделей компенсации дрейфа. Один из них – это обучение с учителем. В этом методе модель обучается на парах «входные данные – выходные данные», чтобы предсказывать выходные данные для новых входных данных. Этот метод может использоваться для обучения моделей, которые предсказывают компенсированные данные датчиков на основе данных с инерциальных датчиков и других датчиков [9].

Другой метод – это обучение без учителя, которое позволяет модели самостоятельно выявлять скрытые структуры в данных и создавать новые признаки. В этом случае модель обучается на необработанных данных и может использовать алгоритмы кластеризации, автокодировщики и генеративные модели, чтобы выявлять закономерности и отделять шум от сигнала.

Третий метод – это обучение с подкреплением, который позволяет модели учиться на основе своих действий и результатов этих действий. В этом случае модель принимает решения на основе текущего состояния системы и получает награду или штраф за свои действия.

Обучение с подкреплением может быть использовано для обучения моделей управления дронами и другими автономными системами, которые используют инерциальные датчики для навигации [10].

С точки зрения источников данных, модели компенсации дрейфа могут использовать различные типы данных, включая данные с инерциальных датчиков, GPS и картографические данные, а также данные, полученные с помощью камер и спидометра, который работает на основе вращения колес [15].

Существует два основных класса методов выделения движущихся объектов, к которым относятся методы выделения границ и методы выделения полной области объекта. При этом основной идеей методов первого класса является поиск отличий векторов оптического потока с последующим построением контуров движущихся на изображении объектов. Методы второго класса в качестве основного инструментария используют группирование сходных векторов из оптического потока в определенной области, которые подаются на выход алгоритма в качестве движущихся объектов.



Рис. 2. Методы машинного обучения.

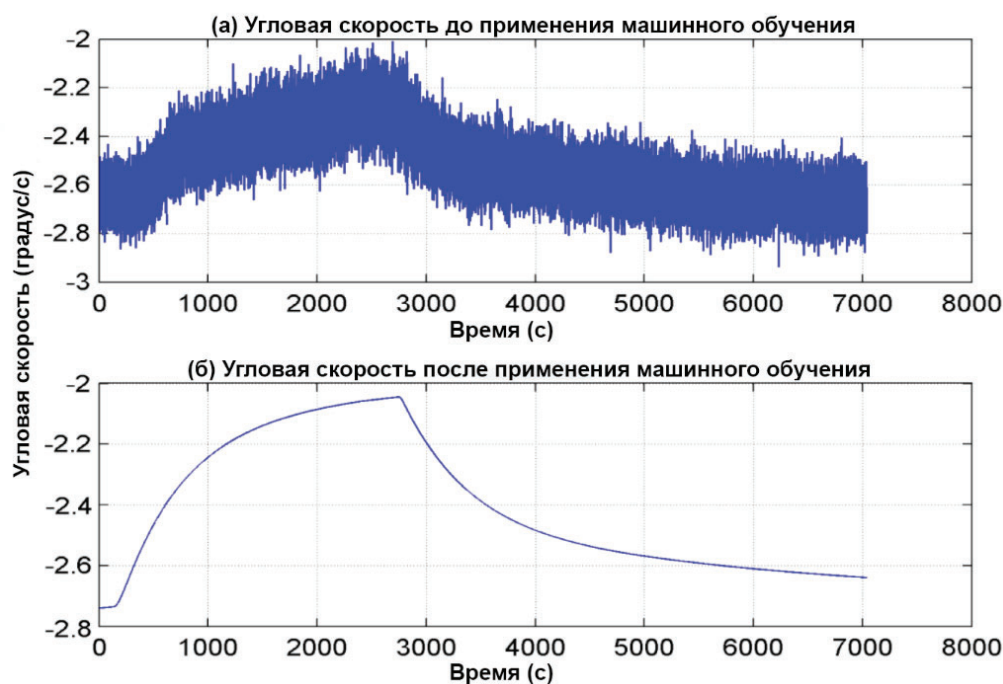


Рис. 3. Сравнение результатов измерений угловой скорости до и после применения модели машинного обучения

Рассмотрим более детально оптический поток, являющийся изображением видимого движения, представляющего собой сдвиг каждой точки между двумя изображениями. Для построения оптического потока существует несколько алгоритмов:

- метод Лукаса-Канаде – локальный метод, который вычисляет оптический поток в каждом пикселе независимо от значений потока в других пикселях. Это дифференциальный метод, так как использует частные производные для оценки. Это достаточно быстрый метод, но, в силу локальности, работает плохо на областях с однородной текстурой (проблема апертуры);

- алгоритм Хорна-Шанка имеет в своей логике построения более глобальный характер, чем метод Лукаса-Канаде, поскольку опирается на предположении, что на всем изображении оптический поток будет достаточно гладким. Этот алгоритм основан на гипотезе об ограничении изменения проекций векторов оптического потока согласно определенным уравнениям;

- различные варианты модификации, основанные на совмещении метода Лукаса-Кана-

де с методом Хорна-Шанка. При неподвижном фоне видеозаписи возможно использование более простого метода – бинаризации или вычитания фона. В нем движение определяется по пикселям, интенсивность которых изменяется относительно интенсивности фоновых пикселей;

- алгоритм бинаризации, который удобен для отслеживания движения – данные с инерциальных датчиков содержат информацию о движении и ориентации системы и могут использоваться как для обучения с учителем, так и без учителя. Обучение модели с использованием этих данных позволяет модели определять смещение датчиков относительно истинного движения объекта [11].

Данные спутниковой геолокации (GPS) и карты могут использоваться для определения положения и ориентации системы в пространстве. Эти данные могут быть использованы для обучения моделей, которые предсказывают компенсированные данные датчиков на основе глобальной позиции и ориентации. Обучение модели на основе данных GPS и карт может помочь улучшить точность определения положения и ориентации системы [12].

Данные с камеры могут быть использованы для уточнения ориентации объекта в пространстве. Эти данные могут быть использованы вместе с данными с инерциальных датчиков для улучшения точности определения движения объекта.

Данные из спидометра или других датчиков скорости могут использоваться для оценки скорости и перемещения объекта. Вместе с данными инерциальных датчиков, эти данные могут быть использованы для улучшения точности оценки движения объекта.

Чем больше разнообразных исходных данных мы можем предоставить для обучения модели компенсации дрейфа, тем более универсальной и эффективной может быть полученная модель. Обширный набор данных обучения позволяет модели учитывать более широкий спектр факторов, влияющих на дрейф, и обеспечивает повышение ее способности компенсировать дрейф в различных условиях эксплуатации [13].

При этом совокупность данных, получаемых от различных источников, выводит реаль-

ные данные пространственного расположения аппарата, на основании чего составляются шаблоны, с помощью которых можно узнать, как информационная система на базе определенной инерциальной системы должна действовать в определенных положениях – например, восстановление скорости на ноль при остановке движения.

Данные инерциальной системы также могут дополнить данные спутниковой геолокации для увеличения точности расположения в пространстве. Например, в мельчайших масштабах применяется инерциальная система измерения, а в больших масштабах – спутниковая геолокация.

Несмотря на преимущества глубокого обучения, это может быть достаточно сложным подходом, который требует большого количества данных и вычислительной мощности для тренировки моделей. Кроме того, использование глубокого обучения может также привести к увеличению задержки в обработке данных, что может быть проблемой в некоторых приложениях [14, 15].

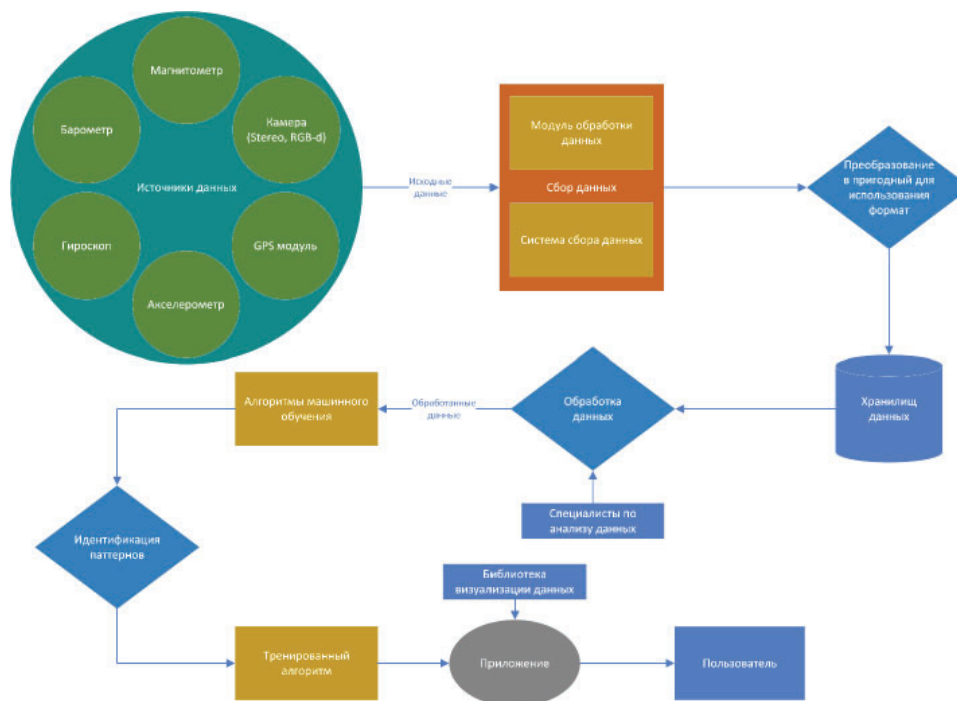


Рис. 4. Схема загрузки данных

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвин М.А. и др. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации // Информационные процессы. 2014. Т. 14. №4. С. 326-339.
2. Синютин С.А. Гибридные многосеверные датчики для бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Ползуновский вестник. 2012. №2-1. С. 171-175.
3. Будкин В.Л. и др. Инерциальные датчики для систем навигации и ориентации // Микросистемная техника. 2000. №2. С. 8-8.
4. Голован А.А. и др. Калибровка в инерциальной навигации // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. 2019. С. 1348-1352.
5. Чуманкин Е.А., Мишин А.Ю. Исследование характеристик датчиков угловой ориентации для оценки возможности применения в составе инерциальных систем управления беспилотными летательными аппаратами // XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2009. С. 108-113.
6. Смирнягин А.Д. Разработка системы на основе биофидбека для тренировки функции равновесия головы человека: магистерская диссертация. 2022.
7. Нгуен Ч.И., Нгуен К.Х., Нгуен В.Х. Метод подавления случайных шумов инерциальных датчиков на основе комплексирования AR-модели и адаптивного фильтра Калмана типа SRUKF при начальной выставке БИНС на неподвижном основании // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26. №2. С. 101-119.
8. Тронов К.А., Белов Ю.С. Нейронные сети MULTI-CONV LSTM для распознавания активности человека на основе датчиков смартфона // E-Scio. 2021. №12 (63). С. 319-325.
9. Смирнов В.А., Правидло М.Н., Снедков А.Б. Метод совместной калибровки инерциальных датчиков беспилотного летательного аппарата с применением нейронных сетей // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. №3. С. 7-8.
10. Долгов Г.А. Сравнение нейронных сетей различных архитектур и DTW алгоритма для задачи распознавания жестов // Восемнадцатая Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов: г. Томск, 5-7 мая 2021 г. STT Publishing, 2021. С. 211.
11. Форсайт Д.А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. Вильямс, 2004. 928 с.
12. Антонович К.М., Карпик А.П. Мониторинг объектов с применением GPS-технологий и других методов определения положения // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2003. №6. С. 123-135.
13. Емельянцева Г.И., Степанов А.П. Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации // СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор, 2016.
14. Калач Г.Г. Использование графических языков программирования высокого уровня для реализации бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2011. №2. С. 69-72.
15. Игонин А.Г., Пирогов У.В., Улыбина Л.В. Использование алгоритмов машинного обучения для решения задачи распознавания движений человека в инерциальных измерительных системах.

DRIFT-COMPENSATION OF INERTIAL SENSORS. NEW DEEP LEARNING-BASED METHODS

© I.G. Gairabekov, N.A. Moiseenko, R.Kh. Gagaev
GSTOU named after acad. M.D. Millionshchikov, Grozny, Russia

This article discusses new methods for drift compensation of inertial sensors based on deep learning. The main problems associated with the drift of inertial sensors are described and examples of inertial sensors that can be used in various fields such as automotive, aviation and space technologies are given. Navigation based on inertial sensors, i.e. accelerometers and gyroscopes has grown significantly in recent years. However, the noise of medium and cheap sensors results in a high error in attitude estimation, especially in the yaw angle. Use of inertial means of measuring acceleration (accelerometer), direction (gyroscope, magnetometer), pressure sensor (height above sea level) to calculate speed, distance and altitude, and the methods used to calculate them (double integration of accelerometer data, to calculate the distance traveled for example) detects drift - small errors in the measurement of acceleration and angular velocity are integrated into ever larger errors in velocity, which are exacerbated by even larger errors in determining the position in space. The drift is due to the fact that the speed itself is not a zero mean signal. To fix it, there are few options. Either the sensors must have unparalleled accuracy, which means that the cost of such a system increases many times and the apparatus using this system becomes unwieldy, or you can profile error patterns and create templates for drift correction, which is a software approach to solving the problem.

Keywords: Inertial Sensors (IMU), drift compensation, deep learning (Deep Learning), neural networks (Neural Networks), filtering algorithms (Kalman filter), signal processing, data fusion (Sensor Fusion), computer vision.

REFERENCES

1. Litvin, M.A. et al. (2014). 'Types of errors in inertial navigation systems and methods of their approximation' *Information processes*. V. 14, №4, pp. 326-339.
2. Sinyutin, S.A. (2012). 'Hybrid multi-axis sensors for strapdown inertial navigation systems', *Polzunovskiy Bulletin*. №2-1, pp. 171-175.
3. Budkin, V.L. et al. (2000). 'Inertial sensors for navigation and orientation systems', *Microsystem Technique*. №2, pp. 8-8.
4. Golovan, A.A. et al. (2019). 'Calibration in inertial navigation', *XIII All-Russian meeting on control problems VSPU-2019*, pp. 1348-1352.
5. Chumankin, E.A. and Mishin, A.Yu. (2009). 'Investigation of the characteristics of angular orientation sensors to assess the possibility of using them as part of inertial control systems for unmanned aerial vehicles'. *XVI St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, pp. 108-113.
6. Smirnyagin, A.D. (2022). Development of a system based on biofeedback for training the balance function of the human head: master's thesis.
7. Nguyen, C.I., Nguyen, K.H. and Nguyen, V.H. (2023). 'A method for suppressing random noise of inertial sensors based on the integration of an AR model and an adaptive Kalman filter of the SRUKF type at the initial alignment of SINS on a fixed base'. *Russia. Radioelectronics*. Vol. 26. №2, pp. 101-119.
8. Tronov, K.A. and Belov, Yu.S. (2021). 'MULTI-CONV LSTM neural networks for human activity recognition based on smartphone sensors'. *E-Scio*, №12 (63), pp. 319-325.
9. Smirnov, V.A., Pravidlo, M.N. and Snedkov, A.B. (2020) 'A method for joint calibration of inertial sensors of an unmanned aerial vehicle using neural networks'. *Modeling, optimization and information technologies*, Vol. 8. №3, pp. 7-8.
10. Dolgov, G.A. (2021). 'Comparison of neural networks of different architectures and the DTW

- algorithm for the problem of gesture recognition'. *Eighteenth All-Russian Conference of Student Research Incubators: Tomsk, May 5-7, 2021*. STT Publishing, p. 211.
11. Forsyth, D.A. and Pons, J. (2004). *Computer vision. Modern approach*. Williams, 928 p.
 12. Antonovich, K.M. and Karpik, A.P. (2003). 'Monitoring of objects using GPS-technologies and other methods for determining the position'. *News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography*. №6, pp. 123-135.
 13. Emelyantsev, G.I. and Stepanov, A.P. (2016). *Integrated inertial-satellite systems of orientation and navigation*. St. Petersburg: Concern "Central Research Institute" Elektropribor.
 14. Kalach, G.G. (2011). 'The use of high-level graphic programming languages for the implementation of a strapdown inertial navigation system'. *Scientific and educational problems of civil protection*, №2. pp. 69-72.
 15. Igonin, A.G., Pirogov, U.V.V. and Ulybina, L.V. The use of machine learning algorithms for solving the problem of recognizing human movements in inertial measuring systems.

РАЗРАБОТКА МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАПОЛЬНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ УЧЕБНОГО СТЕНДА

© А.А. Кожевников

Ростовский государственный университет путей сообщения, Воронеж, Россия

Современный подход в преподавании дисциплин технической направленности заключается в применении обучающих систем на основе цифровых платформ. Наибольшую трудоемкость при разработке занимают программно-аппаратные комплексы. Целью работы является изложение предварительных результатов построения учебного стенда микропроцессорной централизации и автоблокировки (МПЦ и АБ). Среди имеющихся на рынке программно-аппаратных комплексов для обучения по направлению ж/д автоматики и телемеханики отсутствуют системы с необходимой совокупностью потребительских и эксплуатационных характеристик. Решением вопроса о появлении объекта с отличными от аналогов качествами является технология научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок. В основу структурной схемы нашей системы заложен принцип «матрешки», где демонстрационная часть в виде стенда цифровых интерфейсов напольного оборудования является основой для технологического уровня – стенда МПЦ и АБ. Дальнейшим шагом стал проект физического размещения компонентов в пределах отведенного помещения. В качестве базовой схемы обмена информацией была выбрана модель «звезда», где в качестве лучей – подсистемы с напольным оборудованием и рабочие места студентов, а в центре – сервер. Под термином «подсистема» здесь понимается вариант программируемого логического контроллера (ПЛК), в котором управляющая и интерфейсная (схема сопряжения) части разнесены в пространстве и соединены телекоммуникационным мостом. Последнее подразумевает разработку ПЛК в виде нескольких приборов, при этом для их построения предлагается комбинация ограниченного количества типовых блоков.

Ключевые слова: микропроцессорная система, учебный стенд, железнодорожная автоматика и телемеханика.

Формат цитирования: Кожевников А.А. Разработка микропроцессорной системы управления напольным оборудованием учебного стенда // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XIX, №2. 2023. С.14-24. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.66.35.002

Введение

Внедрение на железных дорогах России цифровых систем обеспечения движения поездов актуализирует своевременные шаги со стороны Высшей школы в плане подготовки квалифицированных специалистов. Характер заочного образования предъявляет дополнительные требования к доступности инструментов обучения в особенности по техническим специальностям. Необходимость работы студента не только с методическими материалами, но и с реальными аппаратными средствами в данном случае является залогом качественного усвоения тематических дисциплин. На все это накладывается тенденция государственной политики по тотальной цифровизации информационной среды человека [1]. Таким образом, реализация задач преподавания

дисциплин в рамках обозначенной концепции в первую очередь требует анализа форм подачи знаний [2]. Современный подход заключается в объединении комплекса инструментов в виде обучающей системы на основе цифровых платформ. В качестве последних на передний план выдвигаются методическая, программная и аппаратная составляющие [3]. Инструменты в рамках данных платформ должны обеспечивать достаточную глубину предоставляемого для изучения материала, а также возможность удаленного доступа. Наибольшую трудоемкость при разработке обсуждаемых систем занимают программно-аппаратные комплексы. Целью работы является изложение предварительных результатов построения учебного стенда микропроцессорной централизации и автоблокировки (МПЦ и АБ).

Концепция учебного стенда МПЦ и АБ

Идея внедрения на железной дороге микропроцессорной централизации заключается в приведении к современному состоянию компонентной базы, максимальному уходу от применения реле, повышению надежности и снижению человеческого фактора в задачах управления отдельными устройствами (стрелочными приводами, светофорами и т.д.), автоматизации движения поездов и сопровождения их соответствующими информационными процессами. То же касается и автоблокировки.

Типовая МПЦ (рис. 1) содержит автоматизированные рабочие места диспетчера и электромеханика (АРМ), два центральных процессорных устройства (2 ЦПУ), объектные контроллеры (ОК) и подключенные к ним через каналы телеуправления и телесигнализации (ТУ и ТС) напольные устройства. АРМ обычно представляет собой персональный компьютер с установленным на него специализированным программным обеспечением, позволяющим сотрудникам осуществлять необходимые технологические манипуляции. Первое ЦПУ реализует управление системой в автоматическом режиме в соответствии с заданными алгоритмами и настройками, предварительно произведенными через АРМ. Второе ЦПУ находится в режиме ожидания на случай поломки первого. Функцией ОК является переработка цифровых команд, приходящих от ЦПУ, в сигналы ТУ, а также преобразование сигналов ТС в цифровые сообщения для ЦПУ. В ряду напольных устройств, с которыми может работать МПЦ, в первую очередь стоит отметить наиболее массовые: стрелочные приводы, светофоры и рельсовые цепи.

Разработка подобной микропроцессорной системы даже в упрощенном виде является задачей масштабной по ресурсам и времени, поэтому необходим анализ уже существующих комплексов. Возможности доступных на рынке учебных стендов по направлению ж/д автоматики и телемеханики (ЖАТ) показали себя несколько односторонними [4, 5]:

1) они направлены на освоение эксплуатации соответствующих промышленно выпускаемых устройств, что является предметом среднего профессионального образования;

2) применяемые электронные узлы выпускаются специализированными промышленными предприятиями, что в силу коммерческой тайны не позволяет использовать их для изучения глубинных принципов функционирования, а также крайне ограничивает доступность из-за цены и отсутствия на популярных торговых площадках.

В противовес изложенным тезисам учебный стенд МПЦ и АБ должен обладать соответствующими потребительскими качествами, позволяющими обеспечить дисциплины высшего образования необходимыми инструментами:

1) возможность изучения глубинных принципов функционирования узлов МПЦ и АБ;

2) возможность управления любыми реальными устройствами напольного оборудования или их аналогами-макетами;

3) проектирование и построение учебной системы МПЦ или АБ для конкретного примера станции или перегона;

4) моделирование влияния штатных и нештатных ситуаций на перемещение подвижного состава в рамках разработанной схемы станции или перегона;

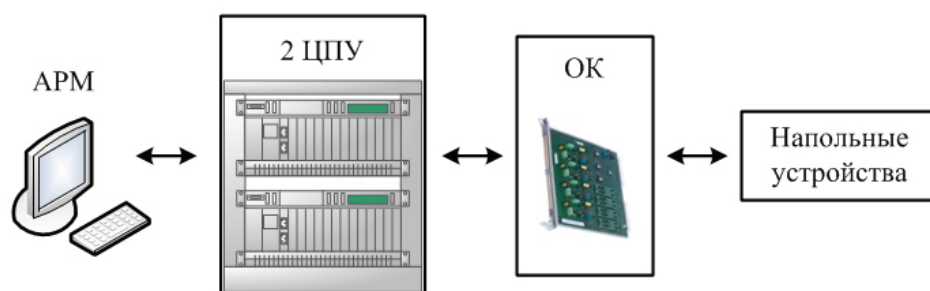


Рис. 1. Общая схема микропроцессорной централизации

5) относительно низкая стоимость компонентов и всей системы.

Также стенд должен обладать характерными для данного класса машин эксплуатационными качествами: функциональность, масштабируемость, аутентичность и надежность.

Функциональность. Устройства, схемы и узлы должны обеспечивать работу закладываемых в систему алгоритмов.

Масштабируемость. Конструкция и логика функционирования узлов должны обеспечивать оперативное расширение системы за счет типовых решений.

Аутентичность. Внешний вид узлов и всей системы, а также набор технологических операций процесса эксплуатации должны по возможности максимально соответствовать промышленным аналогам.

Надежность. Численные параметры компонентов и системы, такие как вероятность безотказной работы или время наработки на отказ, должны быть приемлемо большими. В силу недостаточного количества и качества технического персонала стенд должен обладать максимальной ремонтпригодностью.

Среди имеющихся на рынке учебных стендов ж/д автоматики и телемеханики отсутствуют системы с заявленной выше совокупностью потребительских и эксплуатационных характе-

ристик. Решением вопроса о появлении объекта с отличными от аналогов качествами является технология научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИР и ОКР). В соответствии со стандартными подходами необходимо осуществить прототипирование стенда [6]:

- выбрать исходный прототип;
- разработать структурную схему;
- выполнить проектирование механической части;
- определить элементы информационной системы;
- сформировать представление об электронных узлах и основных компонентах;
- разработать пробные образцы программного обеспечения.

В качестве исходного прототипа для разработки своего учебного стенда нами был выбран тренажер ЭЦ-ЕМ компании «Радиоавионика» (рис. 2). Назначение компонентов соответствует функциям МПЦ ЭЦ-ЕМ: 1) рабочее место дежурного по станции (АРМ ДСП); 2) светорфор; 3) шкафы с центральным процессорным устройством и объектными контроллерами; 4) шкафы кроссовых полей и шкафы вводно-защитные; 5) программно-аппаратный эмулятор стрелок и сигналов. Возможности тренажера ЭЦ-ЕМ позволяют имитировать большее чис-



Рис. 2. Стенд-тренажер фирмы «Радиоавионика» на конференции «Транс ЖАТ-2018»

ло возникающих поездных ситуаций на станции, связанных с некорректной работой ЖАТ. В первую очередь реализуемая программа обучения завязана на АРМ ДСП, где фиксируются «сбои» в работе. Далее, например, электромеханик должен найти проблемный элемент системы: объектный контроллер, сигнал или привод, и устранить неисправность или произвести замену. Также под задачу заказчика на предприятии «Радиоавионика» посредством специализированной САПР осуществляется проектирование нужной мнемосхемы станции или перегона, реализуемой через АРМ ДСП и соответствующее аппаратное наполнение шкафов стенда.

Опираясь на заявленные потребительские качества, а также идеи, реализованные в исходном прототипе, была определена структурная схема системы (рис. 3). В основу заложен принцип «матрешки», где демонстрационная часть в виде стенда цифровых интерфейсов напольного оборудования является основой для технологического уровня (стенда МПЦ и АБ). Подразумевается еще и потенциальная возможность реализовать эксплуатационную составляющую, расширив количество разработанного на тот момент оборудования и программно-

го обеспечения применительно к макету участка железной дороги с несколькими станциями и перегонами. Это позволит в рамках одного проекта создать спектр инструментов для преподавания сразу нескольких дисциплин как высшего, так и среднего образования. В основу демонстрационного уровня закладывается микропроцессорная система управления напольным оборудованием с возможностью изучения процессов формирования и обработки сигналов телеуправления и телесигнализации. Добавление эмулятора стрелок и сигналов, а также аналога АРМ ДСП, позволяет исследовать поездные ситуации как штатного, так и нештатного характера. Вариативность моделей может обеспечить технология сквозного проектирования от САПР станций и перегонов через САПР мнемосхем непосредственно к АРМ ДСП. Дальнейшее развитие данной концепции позволит реализовать полноценную учебную МПЦ с АРМ электромеханика для отработки технологии эксплуатации аналогичных промышленных систем.

Стенд цифровых интерфейсов напольного оборудования

Соединить принцип аутентичности с возможностью изучения глубинных процессов

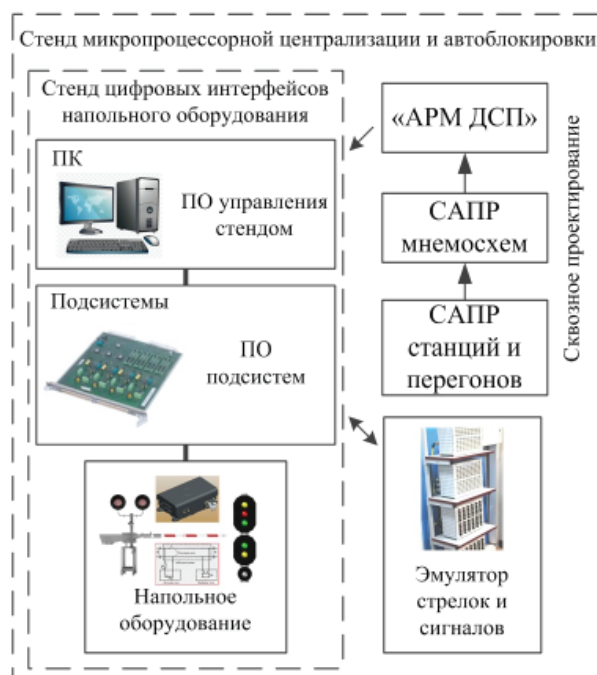


Рис. 3. Структурная схема учебного стенда МПЦ и АБ

основных узлов в рамках лабораторного стенда позволяет применение стандартных напольных устройств, но расположить в небольшой комнате полноценные рельсовые цепи и поезд, конечно, невозможно, поэтому приходится идти на компромисс, уменьшив все, что необходимо, до размера макета. Первым шагом реализации обозначенной концепции является разработка механической части стенда (рис. 4), т.е. проекта физического размещения компонентов в пределах отведенного помещения. В рамках ряда мероприятий был сформирован облик системы [7, 8] и проведены исследования по безопасности воздействия подвижных узлов [9]. Предполагается, что в стенде цифровых интерфейсов напольного оборудования будет одновременно задействовано до трех рабочих мест, позволяющих параллельно осуществлять наглядное изучение управления отдельными напольными устройствами МПЦ: светофором, стрелочными приводами, подвижным составом с рельсовыми цепями, или АБ: подвижным составом с рельсовыми

цепями, светофором, переездной сигнализацией. При этом подразумевается возможность моделирования частных элементов технологии обеспечения движения поездов.

Построение управляющей системы на основе множества микропроцессоров осуществляется на основе постоянного обмена информацией. Для этого в качестве базовой схемы последнего была выбрана модель «звезда», где в качестве лучей – подсистемы с напольным оборудованием и рабочие места студентов, а в центре – сервер. В задачи сервера входит распределение ресурсов стенда между пользователями, чтобы исключить возможность одновременного запроса на управление одним и тем же напольным устройством. В отличие от базовой схемы МПЦ (рис. 1), здесь отсутствуют ЦПУ, что является еще одной условностью, поскольку нет необходимости обеспечивать уровень надежности применяемых промышленных систем, а требуемые функции ЦПУ берут на себя ЭВМ рабочих мест студентов.

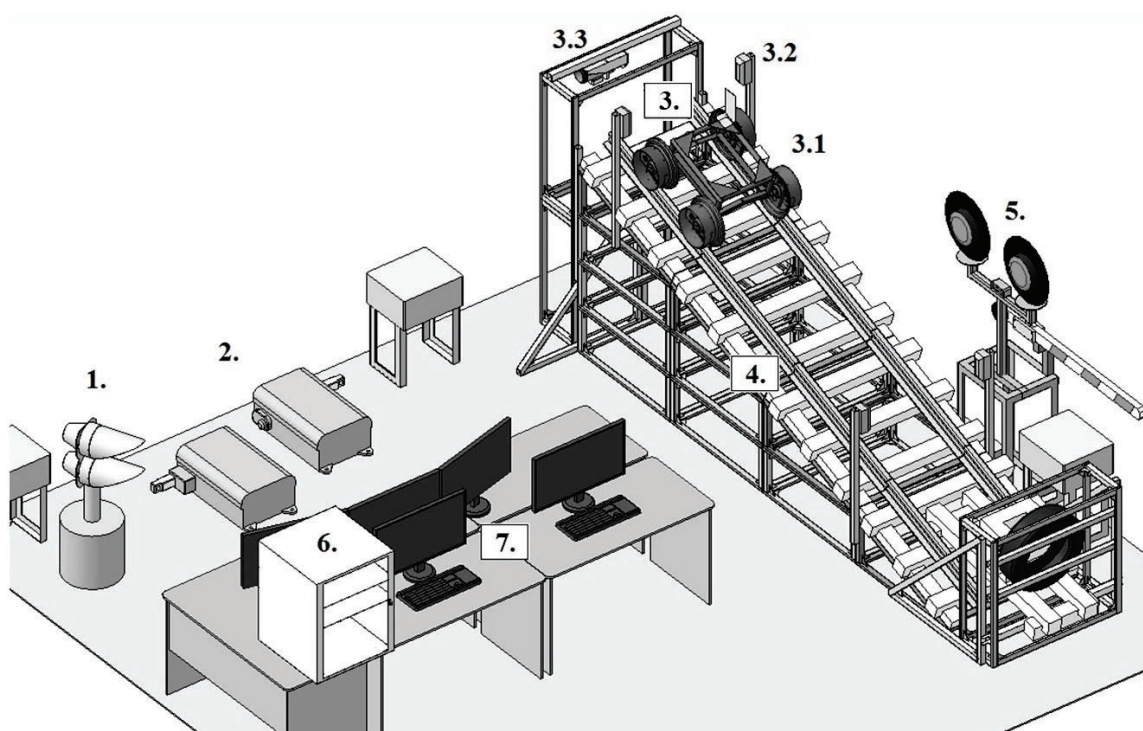


Рис. 4. Виртуальный макет стенда цифровых интерфейсов напольного оборудования.

1 – светофор (СВ), 2 – стрелочные приводы (СП), 3 – макет подвижного состава (ТЛ), где 3.1 – тележка, 3.2 – датчики пересечения периметра, 3.3 – двигатель лебедки, 4 – три участка с рельсовыми цепями (РЦ), 5 – переездная сигнализация (ПС), 6 – телекоммуникационный шкаф с объектными контроллерами (ОК) и сервером, 7 – рабочие места студентов (РМ)

В исходном варианте стенда предлагается реализовать пять проводных подсистем: светофора, рельсовых цепей, стрелочного привода, переездной сигнализации и управления тележкой. Под термином «подсистема» здесь понимается вариант программируемого логического контроллера (ПЛК), в котором управляющая и интерфейсная (схема сопряжения) части разнесены в пространстве и соединены телекоммуникационным мостом (рис. 5). Последнее подразумевает разработку ПЛК в виде нескольких приборов, что выливается в необходимость поиска оптимального варианта каналов связи, обеспечивающих приемлемую надежность и аутентичность при небольших затратах.

Первостепенным в начале разработки является желание обеспечить функциональность подсистем, т.е. подключение напольного оборудования к управлению посредством персонального компьютера. Рассуждения в данной канве можно обозначить как концепцию на основе общих принципов. В качестве приборной базы ПЛК была выбрана платформа Ардуино,

представляющая собой, по сути, электронный конструктор, содержащий как набор различных плат микроконтроллеров, так и широкий выбор быстро включаемых в общую электронную схему компонентов. Таким образом, в первом приближении подсистема с проводным соединением виделась как пара плат Ардуино Уно, телемост на основе стандартного цифрового интерфейса и специализированной схемы сопряжения. Но разработка ПЛК в таком виде не отвечала аутентичности и возможности исследовать глубинные процессы функционирования узлов МПЦ и АБ. Последнее означает, что код управляющей команды должен быть преобразован в сигналы телеуправления на уровне объектного контроллера, а следовательно, ОК является отдельным и центральным элементом изучения в рамках соответствующей учебной дисциплины. Здесь стандартный интерфейс уступает место схеме телекоммуникационного соединения на основе специальных каналаобразующих устройств. Развитие [10, 11] рассмотренной концепции было доведено до экспериментальной партии приборов стен-

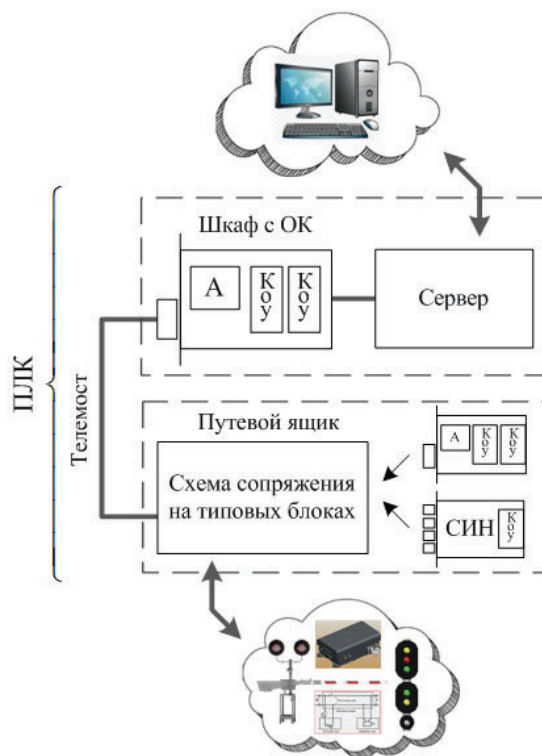


Рис. 5. Подсистема как программируемый логический контроллер. А – Ардуино Уно, Кou – каналаобразующее устройство, СИН – блок силовой интерфейсный наборный

да и подключения переездной сигнализации (рис. 4), но, как показала практика, ненадежной является компонентная база применяемой схемы телекоммуникационного соединения на основе управления по напряжению.

Улучшить ситуацию позволила идея использовать для телемоста токовую петлю [12, 13]. Первичный анализ позволил спрогнозировать переход к концепции «Типовых блоков», позволяющей взрывообразно повысить масштабируемость и надежность [14], и не только в численных показателях, но и в части ремонтпригодности системы. Суть концепции заключается в применении для построения приборов стенда комбинации ограниченного количества типовых блоков, каждый из которых может быть настроен под конкретную задачу, в данном случае – под определенное напольное устройство. На начальном этапе таких предлагается всего два: ОК и СИН (рис. 5). Платформа Ардуино является, по сути, электронным конструктором, и этот подход был перенесен нами на синтез заявленных блоков стенда. С другой стороны, обеспечение аутентичности требует использовать промышленные стандарты для корпусов электронного оборудования. Таким образом, в основе каждого блока лежит база, представляющая собой плату в размерах 3U на 220 мм, к которой монтируются компоненты конструктора Ардуино или другие устройства, выполненные в соответствующих размерах. ОК является самым простым, поскольку состоит из Ардуино Уно и каналобразующих устройств. СИН, как интерфейсный блок, наполнен реле, датчиками, специальными блоками питания и т.д. Таким образом, объединение двух стандартов позволяет унифицировать подход к построению подсистем.

Разработка программного обеспечения

Основные шаги технологии разработки программного обеспечения (ПО) включают формирование алгоритмов и технического задания, написание исходного кода, несколько этапов тестирования и отладку.

Концепция учебного стенда МПЦ и АБ подразумевает ПО для формирования двух уровней: демонстрационного и технологиче-

ского. К первому относится ПО объектных контроллеров, сервера и РМ студентов, а ко второму – САПР станций и перегонов, САПР мнемосхем и «АРМ ДСП» (рис. 3).

Функционирование напольных устройств, по сути, сводится к включению/выключению рабочих электрических цепей и установлению контрольных сигналов. Следующий уровень управления определяется ОК, основной задачей которых является переработка команд в сигналы ТУ и формирование сообщений на основе ТС. Таким образом, функционирование объектных контроллеров всех пяти подсистем строится на схожих программных алгоритмах, которые, в свою очередь, опираются на протоколы обмена с сервером и РМ [15]. ПО рабочих мест студентов осуществляет визуализацию действий пользователя по управлению напольными устройствами. Например, по заданию необходимо продемонстрировать движение макета поездного состава (рис. 4), что по нажатию соответствующей кнопки реализуется не только физически на стенде, но и отображается на экране монитора.

ПО технологического уровня разрабатывается в рамках концепции сквозного проектирования. Идея такого подхода заключается в том, что результаты применения одной САПР являются входными данными для другой. Так, вначале на основе первой САПР реализуется схема соответствующей станции (или перегона) (рис. 6), описываются в чертежах основные компоненты управляющей системы, обеспечивающей здесь движение поездов. Далее САПР мнемосхем использует полученные файлы в качестве основы для синтеза интерфейса пользователя, в наглядном виде воспроизводящего структуру и динамику состояний объекта или процесса управления подвижным составом. Этот результат загружается в аналог АРМ ДСП, где осуществляется виртуальное движение поездов через созданную мнемосхему, моделируются штатные и нештатные ситуации.

Таким образом, студент получает возможность на базе одного стенда последовательно перейти от демонстрации работы напольных устройств к изучению внутренних процессов

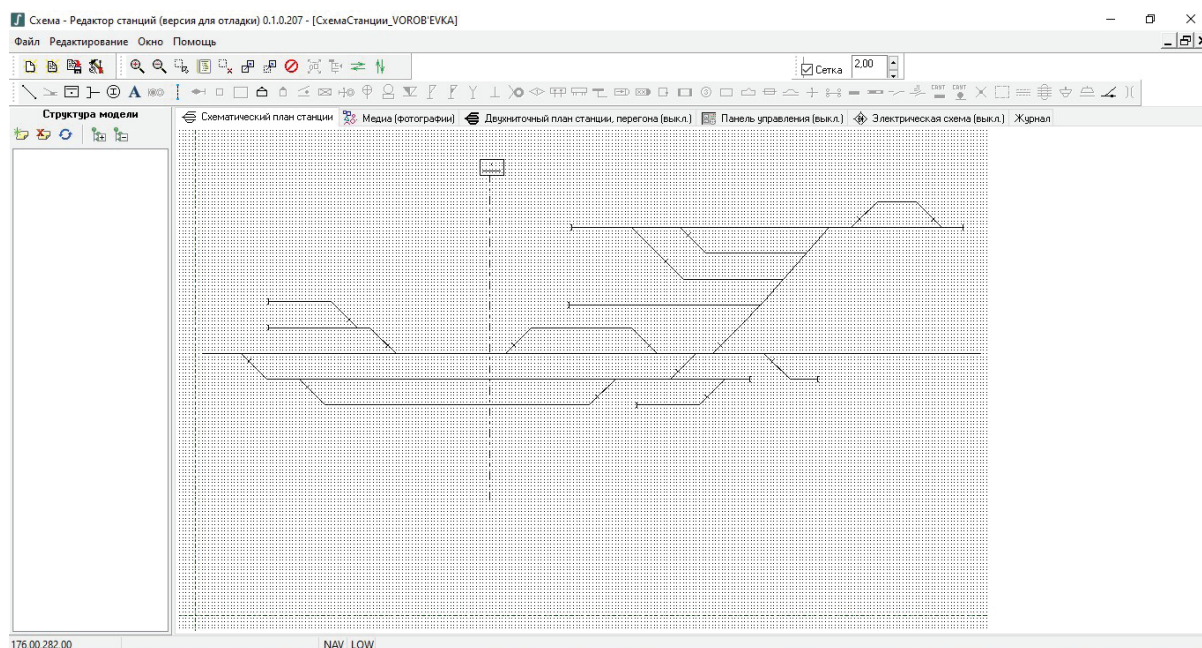


Рис. 6. Схематический план станции Воробьевка в исходной версии САПР станций и перегонов

по управлению ими, и далее – к технологии обеспечения движения на уровне железнодорожной автоматики и телемеханики.

Заключение

Разработка учебного стенда ведется в соответствии с технологией НИР и ОКР, поскольку на рынке отсутствуют системы, отвечающие заявленной совокупности потребительских и эксплуатационных характеристик. Рассмотрены предварительные этапы реа-

лизации прототипа. В рамках текущей концепции построения аппаратное обеспечение микропроцессорных подсистем предлагается формировать посредством нескольких приборов на основе типовых блоков. Развитие данного подхода позволит в будущем оперативно создавать также и другие автоматизированные учебные стенды с применением электро-механических и измерительных узлов с телеуправлением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Указ Президента Российской Федерации от 09.05.2017 г. №203 «О Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017-2030 годы».
2. *Gordienko E.* Features of modern education in branch university / *Ekaterina Gordienko, Snezhana Gosteva, Olga Kalacheva, Alexey Kozhevnikov, Natalia Kustova, Svetlana Pritsepova, Boris Sveshnik* // IJAEDU-International E-Journal of Advances in Education. 2020. Vol. VI. Issue 16, April. Pp. 78-81.
3. *Кондратьев А.Е.* Концепция обучающей системы «учебный стенд МПЦ и АБ» // Сборник статей II Международной студенческой конференции «Современные технологии обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте». Воронеж, 2020. С. 18-20.
4. *Лунев С.А.* Тренажеры для изучения микропроцессорных систем ЖАТ / *С.А. Лунев, С.В. Гришечко, С.Л. Лисин, А.П. Безотеческий, С.Г. Трушников* // Автоматика, связь, информатика. 2019. №5. С. 40-42.
5. *Абзалов В.Р.* Стенд проверки реле железнодорожной автоматики и телемеханики / *В.Р. Абзалов, А.А. Долгов, А.В. Степин, В.Л. Федяев* // Военный научно-практический вестник. 2016. №2. С. 4-7.
6. *Кожевников А.А.* Основные цели и задачи разработки учебного стенда МПЦ и АБ // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт-2022»). Воронеж, 2022. С. 116-118.
7. *Кожевников А.А., Артамонова А.А.* Проектирование первичных элементов учебного стенда МПЦ и АБ // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт-2019»): секция «Теоретические и практические вопросы транспорта». Воронеж, 2019. С. 55-58.
8. *Черенков В.С.* Проектирование первичных элементов учебного стенда переездной сигнализации // Сборник статей II Международной студенческой конференции «Современные технологии обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте». Воронеж, 2020. С. 30-32.
9. *Федоринин Н.И., Кожевников А.А.* Моделирование движения двухосной тележки по наклонной непрерывной кусочно-линейной поверхности // Авиакосмические технологии (АКТ-2019). Труды XX Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. Воронеж, 2019. С. 379-385.
10. *Кожевников А.А., Пыльнев Д.В.* Проектирование контроллера управления напольным оборудованием подсистем учебного стенда МПЦ и АБ // Авиакосмические технологии (АКТ-2020). Труды XXI Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. Воронеж, 2020. С. 344-350.
11. *Кожевников А.А.* Конструкции цифровых интерфейсов напольного оборудования учебного стенда // Перспективы транспортной отрасли: Труды 1-й Международной научно-практической конференции. Воронеж, 2021. С. 40-43.
12. *Кожевников А.А.* Прототипирование учебного стенда МПЦ и АБ в части цифровых интерфейсов напольного оборудования // Труды Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» («Транспорт-2022»). Воронеж, 2022. С. 112-115.
13. *Федосов С.А.* Схема каналов телеуправления с проводным соединением учебного стенда МПЦ и АБ // Сборник статей IV Международной студенческой конференции «Современные технологии обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте». Воронеж, 2022. С. 9-11.
14. *Федосов С.А.* Интенсивность отказов каналов токовой петли учебного стенда МПЦ и АБ // Сборник статей IV Международной студенческой конференции «Современные технологии обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте». Воронеж, 2022. С. 11-13.
15. *Кожевников А.А.* Программное обеспечение учебного стенда МПЦ и АБ // Авиакосмические технологии (АКТ-2021). Труды XXII Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. Воронеж, 2021. С. 87-91.

DEVELOPMENT OF A MICROPROCESSOR CONTROL SYSTEM FOR THE FLOOR EQUIPMENT OF THE TRAINING STAND

© A.A. Kozhevnikov

Rostov State Transport University, Voronezh, Russia

The modern approach to teaching technical disciplines consists in the use of training systems based on digital platforms. The greatest complexity in the development is occupied by software and hardware complexes. The purpose of the work is to present the preliminary results of the construction of a training stand for microprocessor centralization and auto-locking. Among the hardware and software complexes available on the market for training in the direction of railway automation and telemechanics, there are no systems with the necessary set of consumer and operational characteristics. The solution to the issue of the appearance of an object with qualities different from analogues is the technology of research and development. The structural scheme of our development is based on the "matryoshka" principle, where the demonstration part in the form of a stand of digital interfaces of floor equipment is the basis for the technological level – the microprocessor centralization and auto-locking stand. The next step was the project of the physical placement of components within the allotted space. The "star" model was chosen as the basic information exchange scheme, where subsystems with floor equipment and students' workplaces were used as beams, and a server was in the center. The term "subsystem" here refers to a variant of a programmable logic controller (PLC) in which the control and interface (interface circuit) parts are spaced apart and connected by a telecommunications bridge. The latter implies the development of a PLC in the form of several devices, while a combination of a limited number of standard blocks is proposed for their construction.

Keywords: microprocessor system, training stand, railway automation and telemechanics.

REFERENCES

1. (2017) Decree of the President of the Russian Federation №203 dated 09.05.2017 "On the Strategy for the Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017-2030".
2. Ekaterina Gordienko, Snezhana Gosteva, Olga Kalacheva, Alexey Kozhevnikov, Natalia Kustova, Svetlana Pritsepova and Boris Sveshnikov. (2020). Features of modern education in branch university. *IJAEDU-International E-Journal of Advances in Education*. Vol. VI. Issue 16, April, pp. 78-81.
3. Kondratiev, A.E. (2020). 'The concept of the training system "training stand of the MPC and AL"'. In the collection of articles of the II International Student Conference "Modern technologies for ensuring safety in railway transport". (Voronezh, 2020) pp. 18-20.
4. Lunev, S.A., Grishchko, S.V., Lisin, S.L., Bezotechesky, A.P. and Trushnikov, S.G. (2019). 'Simulators for studying microprocessor systems'. *Automation, communications, informatics*. №5. pp. 40-42.
5. Abzalov, V.R., Dolgov, A.A., Stepin, A.V. and Fedyaev, V.L. (2016). 'Test stand for railway automation and telemechanics relays'. *Military Scientific and practical Bulletin*. №2. pp. 4-7.
6. Kozhevnikov, A.A. (2022). 'The main goals and objectives of the development of the training stand of the MPC and AL'. *Proceedings of the international Scientific and practical conference "Transport: science, education, production" ("Transport-2022")*. (Voronezh, 2022) pp. 116-118.
7. Kozhevnikov, A.A. and Artamonova, A.A. (2019). 'Designing primary elements of the training stand of the MPC and AL'. *Proceedings of the international Scientific and practical conference "Transport: science, education, production" ("Transport-2019"): section "Theoretical and practical issues of transport"*. (Voronezh, 2019) pp. 55-58.
8. Cherenkov, V.S. (2020). 'Design of primary elements of a moving alarm training stand'. In the collection of articles of the II International Student Conference "Modern safety technologies in railway transport". (Voronezh, 2020) pp. 30-32.

9. Fedorinin, N.I. and Kozhevnikov, A.A. (2019). 'Modeling the movement of a biaxial trolley along an inclined continuous piecewise linear surface'. Aerospace Technologies. *Proceedings of the XX International Scientific and Technical Conference and school of young scientists, postgraduates and students. (Voronezh, 2019)* pp. 379-385.
10. Kozhevnikov, A.A. and Pylnev, D.V. (2020). 'Design of the controller for the control of the floor equipment of the subsystems of the training stand of the MPC and AL'. Aerospace technologies. *Proceedings of the XXI International Scientific and Technical Conference and school of young scientists, postgraduates and students. (Voronezh, 2020)* pp. 344-350.
11. Kozhevnikov, A.A. (2021). 'Designs of digital interfaces of the floor equipment of the training stand'. *Prospects of the transport industry: Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. (Voronezh, 2021)* pp. 40-43.
12. Kozhevnikov, A.A. (2022). 'Prototyping of the MPC and AL training stand in terms of digital interfaces of outdoor equipment'. *Proceedings of the international Scientific and Practical conference "Transport: science, education, production" ("Transport-2022")*. (Voronezh, 2022) pp. 112-115.
13. Fedosov, S.A. (2022). 'Scheme of remote control channels with a wired connection of the training stand of the MPC and AL'. In the collection of articles of the IV International student Conference "Modern technologies for ensuring safety in railway transport". (Voronezh, 2022) pp. 9-11.
14. Fedosov, S.A. (2022). 'The failure rate of the channels of the current loop of the training stand of the MPC and AL'. In the collection of articles of the IV International student Conference "Modern technologies for ensuring safety in railway transport". (Voronezh, 2022) pp. 11-13.
15. Kozhevnikov, A.A. (2021). 'Software of the training stand of the MPC and AL'. Aerospace technologies. *Proceedings of the XXII International Scientific and Technical Conference and school of young scientists, postgraduates and students. (Voronezh, 2021)* pp. 87-91.

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УЧЕТА САМОЗАНЯТЫХ СТУДЕНТОВ

© М.Ш. Минцаев, Э.Д. Алисултанова, А.А. Мидаева

ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

В данной статье рассматривается разработка автоматизированной информационной системы для учета доходов и расходов самозанятых студентов. В современном обществе все больше людей занимаются самозанятостью, и студенты не являются исключением. Однако учет доходов и уплаты налогов может быть сложным и запутанным процессом, особенно для молодых людей, которые только начинают свою карьеру. В работе проведен обзор литературы, описана методика исследования, разработки и внедрения системы. В статье описывается процесс разработки автоматизированной информационной системы, которая может помочь студентам-самозанятым управлять своими доходами и налоговыми отчислениями. Она предоставляет удобный интерфейс для ввода информации о доходах и расходах, а также расчет налоговых платежей в соответствии с законодательством.

Также в статье рассматриваются преимущества использования такой системы для студентов и государства в целом. Система может помочь студентам вести учет своих доходов и расходов, позволяя им лучше планировать свой бюджет. Она также может помочь государству в сборе налоговых отчислений от самозанятых студентов.

Результаты исследования показали, что автоматизированная информационная система для учета самозанятых студентов обладает высокой эффективностью и удобством использования. В статье также проведено сравнение результатов исследования с имеющимися данными в литературе, а также обсуждены достигнутые цели и задачи, преимущества и недостатки разработанной системы. В заключении отмечается, что разработанная система может быть полезна для университетов и других учебных заведений, а также для самозанятых студентов и фрилансеров в целом, и возможна доработка и усовершенствование системы в дальнейшем.

Ключевые слова: Автоматизированная информационная система, учет, доходы, расходы, самозанятые студенты, бухгалтерский учет, фрилансеры, методика тестирования, разработка системы, обсуждение результатов.

Формат цитирования: Минцаев М.Ш., Алисултанова Э.Д., Мидаева А.А. Исследование и разработка автоматизированной информационной системы для учета самозанятых студентов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX, №2. С.25-31. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.94.41.003

В условиях современной экономической обстановки с 2019 г. введен новый налоговый режим, а именно появился налог на профессиональный доход (НПД) [2].

В последнее время все больше граждан России заняты самозанятостью, включая студентов, которые зарабатывают дополнительные средства на различных проектах. Однако система учета самозанятых граждан в России до сих пор недостаточно развита, что создает проблемы как для государства, так и для самих граждан. В частности, учет и оплата налогов для самозанятых граждан может быть слож-

ным и трудоемким процессом, что может отпугнуть многих потенциальных самозанятых студентов.

В связи с этим, разработка автоматизированной информационной системы для учета самозанятых студентов может значительно упростить процесс учета и налогообложения, что позволит студентам сосредоточиться на своих проектах, а не на бюрократических процедурах. Цель настоящей статьи – исследовать возможность создания автоматизированной информационной системы для учета самозанятых студентов, а также оценить ее эффектив-

ность и практическую значимость. В данной статье будут рассмотрены особенности самозанятости студентов, существующие подходы к учету самозанятых граждан в России, а также представлены результаты исследования, разработки и тестирования автоматизированной информационной системы. В итоге статья может привести к улучшению учета и оплаты налогов для самозанятых студентов, а также предоставить ценную информацию для государственных органов, занимающихся разработкой и совершенствованием системы учета самозанятых граждан.

Обзор литературы по теме «Исследование и разработка автоматизированной информационной системы для учета самозанятых студентов» показывает, что существующие системы учета самозанятых граждан в России не являются удобными и эффективными для самозанятых студентов. В современном информационном мире, где все более распространены технологии, упрощающие жизнь людей, возникает необходимость в создании автоматизированных информационных систем для учета самозанятых студентов.

Ранее проводились исследования в области разработки и внедрения подобных систем для учета самозанятых граждан. Так, Бахвалов и Короткова (2019) провели исследование существующих решений для учета самозанятых граждан в России и выявили проблемы, которые возникают при использовании этих систем. Они также предложили разработать новую автоматизированную информационную систему для учета самозанятых граждан, которая бы решала выявленные проблемы и была бы удобной и эффективной для самозанятых граждан.

Аналогичные исследования проводились и за рубежом. Например, Барто и соавторы (2020) описывают разработку системы для учета и налогообложения самозанятых граждан в США. Они отмечают, что создание автоматизированной системы позволяет сократить время и ресурсы, затрачиваемые на учет и налогообложение самозанятых граждан, и повысить точность расчетов.

На данный момент можно выделить ряд

проблем, связанных с применением нового налогового режима.

1. Неясность в определении места ведения деятельности налогоплательщиком.

2. Отсутствие возможности получения достоверных сведений о применении контрагентом НПД.

3. Повышенные налоговые риски в связи с возможностью аннулирования разрешения на применение специального налогового режима «Налог на профессиональную деятельность» задним числом.

4. Сложности в отнесении операций к облагаемым и не облагаемым налогом на профессиональную деятельность.

5. Неясность порядка отражения операций с плательщиками НПД в бухгалтерском учете и трудоемкость данного процесса в некоторых случаях [3].

Таким образом, обзор литературы показывает, что создание автоматизированной информационной системы для учета самозанятых студентов может значительно упростить процесс учета и налогообложения, что позволит студентам сосредоточиться на своих проектах, а не на бюрократических процедурах.

Для исследования и разработки автоматизированной информационной системы для учета самозанятых студентов была применена комплексная методика, включающая несколько этапов.

На первом этапе проводился анализ требований и потребностей студентов в учете своей деятельности как самозанятых. Было проведено исследование, в ходе которого определены основные функциональные требования к системе, а также необходимые условия для ее эффективной работы.

На следующем этапе были определены основные технические требования к системе. Основное предназначение технических требований – формулировка технических требований заказчика. Это могут быть требования заказчика как на этапе подбора оборудования, так и требования на разработку нового оборудования [13].

Была проведена оценка различных технологий и платформ, которые могут быть ис-

пользованы для создания системы, а также были определены требования к безопасности и защите данных.

После этого была разработана концепция автоматизированной информационной системы для учета самозанятых студентов. Был определен ее функционал и взаимодействие с другими системами, а также была проведена оценка возможностей ее расширения и улучшения.

Далее, на основе концепции была создана прототипная версия системы, которая была протестирована на небольшой выборке студентов. В ходе тестирования были выявлены некоторые проблемы и недостатки, которые были исправлены в последующих версиях системы.

В конце была проведена оценка эффективности и эргономики системы, а также оценка удовлетворенности ее пользователями.

Таким образом, методика исследования включала анализ требований и потребностей пользователей, определение функциональных и технических требований, разработку концепции, создание прототипа, тестирование и оценку эффективности.

На основе концепции, разработанной на предыдущем этапе, была начата разработка автоматизированной информационной системы для учета самозанятых студентов.

Первоначально была разработана архитектура системы, определены основные модули и их функции, а также проведено проектирование базы данных.

База данных – это упорядоченный набор структурированной информации или данных, которые обычно хранятся в электронном виде в компьютерной системе. База данных обычно управляется системой управления базами данных (СУБД) [10].

SQL – это язык программирования, используемый в большинстве реляционных баз данных для запросов, обработки и определения данных, а также контроля доступа. SQL был разработан в IBM в 1970-х годах. Со временем у стандарта SQL ANSI появились многочисленные расширения, разработанные такими компаниями, как IBM, Oracle и Microsoft. Хотя в настоящее время SQL все еще широко используется, начали появляться новые языки

программирования запросов [10].

Для создания системы были выбраны современные технологии и платформы, которые позволили создать функциональную и надежную систему.

Доходы – это денежные и неденежные средства, получаемые в качестве награды за ведение производственной, реализационной, финансовой и инвестиционной деятельности. В зависимости от характера и условий получения в бухгалтерском учете отличают доходы от обычных видов деятельности и прочие доходы.

В свою очередь, к доходам от обычных видов деятельности относятся: выручка от продажи товаров, плата за выполнение работ и оказание услуг, дебиторская задолженность, лицензионные платежи, арендная плата и роялти. В группу прочих доходов включается прибыль, полученная предприятием в результате совместной деятельности, кредиторская задолженность с истекшим сроком исковой давности и некоторые другие виды доходов. В налоговом учете под доходами понимаются доходы от реализации и внереализационные доходы [14].

Одним из главных модулей системы является модуль учета доходов. В этом модуле студенты могут заносить информацию о своих доходах, а система автоматически рассчитывает сумму налога и предоставляет информацию для заполнения налоговой декларации. Кроме того, система позволяет формировать отчеты и статистику по доходам и расходам студентов.

Вторым важным модулем является модуль учета расходов. В этом модуле студенты могут вводить информацию о своих расходах, например, на покупку инструментов или расходы на организацию мероприятий. Система автоматически рассчитывает сумму расходов и отображает ее в общей статистике.

Еще одним важным модулем является модуль уведомлений. Система автоматически уведомляет студентов о предстоящих сроках подачи налоговых деклараций, а также о необходимости оплаты налоговых платежей. Этот модуль позволяет студентам не забывать о своих обязательствах и своевременно выполнять все необходимые процедуры.

Кроме того, система предоставляет возможность общения студентов с консультантами по налоговым вопросам, а также позволяет студентам оценивать качество консультаций.

В целом разработанная система позволяет студентам удобно и эффективно управлять своей самозанятой деятельностью, осуществлять учет доходов и расходов, заполнять налоговые декларации и выполнять все необходимые процедуры.

Архитектура информационной системы – концепция, определяющая модель, структуру, выполняемые функции и взаимосвязь компонентов информационной системы [1].

Архитектура разработанной автоматизированной информационной системы для учета самозанятых студентов была разработана с учетом модульной структуры. Она состоит из следующих основных модулей:

1. Модуль учета доходов, включающий функции ввода и хранения информации о доходах, автоматический расчет налогов, формирование отчетности и статистики.

2. Модуль учета расходов, включающий функции ввода и хранения информации о расходах, автоматический расчет суммы расходов, формирование отчетности и статистики.

3. Модуль уведомлений, включающий функции автоматической отправки уведомлений о предстоящих сроках подачи налоговых деклараций и необходимости оплаты налоговых платежей.

4. Модуль консультаций, включающий функции общения студентов с консультантами по налоговым вопросам и оценки качества консультаций.

5. Модуль администрирования, включающий функции управления доступом к системе и обработки запросов пользователей.

Для разработки системы были использованы следующие технологии:

1. Python – для разработки серверной части приложения и взаимодействия с базой данных. Python – это высокоуровневый язык программирования, отличающийся эффективностью, простотой и универсальностью использования. Он широко применяется в разработке веб-приложений и прикладного программного

обеспечения, а также в машинном обучении и обработке больших данных. За счет простого и интуитивно понятного синтаксиса является одним из распространенных языков для обучения программированию [7].

2. HTML, CSS, JavaScript – для разработки пользовательского интерфейса. JS – это императивный язык программирования. HTML и CSS – описательные языки, они не приказывают, а декларируют, в данном случае как что-то должно выглядеть [11].

PostgreSQL – для хранения данных. PostgreSQL – это объектно-реляционная система управления базами данных (ORDBMS), наиболее развитая из открытых СУБД в мире. Имеет открытый исходный код и является альтернативой коммерческим базам данных [6].

Git – для контроля версий. Git – система управления версиями с распределенной архитектурой. В отличие от некогда популярных систем вроде CVS и Subversion (SVN), где полная история версий проекта доступна лишь в одном месте, в Git каждая рабочая копия кода сама по себе является репозиторием [15].

Процесс разработки и внедрения системы включал в себя следующие этапы:

1. Определение требований к системе и разработка концепции.

2. Проектирование архитектуры системы и разработка базы данных.

3. Разработка серверной части приложения и пользовательского интерфейса.

4. Тестирование и отладка системы.

5. Развертывание и внедрение системы на рабочих местах студентов.

6. Проведение обучения пользователей и технической поддержки.

Конечным результатом разработки и внедрения системы стало обеспечение студентов удобным и эффективным инструментом учета и управления их самозанятой деятельностью, а также повышение качества налоговых услуг и уменьшение риска нарушения налогового законодательства.

Тестирование систем – важный этап производства ПО, направленный на детальное исследование программного кода и выявление ошибок в работе систем. Одна из главных

целей тестирования – проверка соответствия работоспособности системы в целом или ее отдельных модулей ожиданиям заказчика. Тестирование ПО позволяет своевременно выявить дефекты кода, повысить надежность и отказоустойчивость системы, избежать финансовых и репутационных потерь, связанных с нестабильной работой готового решения [12].

Тестирование разработанной автоматизированной информационной системы для учета самозанятых студентов проводилось на нескольких этапах.

Первый этап – это модульное тестирование, которое заключалось в проверке каждого модуля системы на соответствие функциональным требованиям. Для этого были разработаны тестовые сценарии и проведены тесты на уровне кода.

Второй этап – это интеграционное тестирование, которое позволило проверить работоспособность системы в целом, а не только ее отдельных модулей. Для этого были разработаны сценарии, которые моделировали работу системы в реальных условиях.

Третий этап – это приемочное тестирование, которое проводилось совместно с заказчиком и позволило проверить соответствие системы функциональным требованиям и ожиданиям пользователя. Для этого были разработаны тестовые сценарии, которые проверяли все функции системы.

Результаты тестирования показали высокую стабильность и работоспособность системы. В ходе тестирования не было выявлено никаких серьезных ошибок или сбоев в работе системы. Были обнаружены некоторые мелкие ошибки, которые были исправлены в рамках отладки [4].

Таким образом, тестирование системы позволило проверить работоспособность и стабильность разработанной системы для учета самозанятых студентов. Результаты тестирования подтвердили высокое качество и соответствие функциональным требованиям.

Обсуждение результатов исследования позволяет оценить эффективность и значимость разработанной автоматизированной информационной системы для учета самозанятых студентов.

Сравнение результатов исследования с имеющимися данными в литературе показало, что разработанная система является новаторской и оригинальной. В научной литературе отсутствуют подобные системы, которые были бы созданы специально для учета самозанятых студентов.

Анализ достижения поставленных целей и задач показал, что разработанная система полностью соответствует всем поставленным задачам и целям. Система обладает широким спектром функций, которые позволяют учет самозанятых студентов, контроль доходов и расходов, а также генерацию отчетности.

Обсуждение преимуществ и недостатков автоматизированной информационной системы позволяет оценить ее значимость и применимость в реальной жизни. Среди преимуществ можно отметить:

1. Высокую эффективность учета и контроля доходов и расходов.

2. Возможность автоматизации процессов ведения бухгалтерского учета. Автоматизация бухгалтерского учета – это комплекс программных средств, который позволяет вести непрерывное фиксирование и анализ данных для получения количественной экономической информации о деятельности предпринимательских и иных организаций [8].

3. Удобство и простоту использования системы.

4. Возможность получения отчетности в режиме реального времени.

Среди недостатков можно отметить:

1. Возможность возникновения ошибок при внесении данных.

2. Необходимость регулярного обновления и поддержания системы.

Таким образом, разработанная автоматизированная информационная система для учета самозанятых студентов является эффективным и удобным инструментом для учета доходов и расходов самозанятых студентов, а также для ведения бухгалтерского учета. Внедрение данной системы позволит ускорить процесс ведения бухгалтерского учета, повысить его точность и минимизировать возможность ошибок.

В результате проведенного исследования была разработана автоматизированная инфор-

мационная система для учета самозанятых студентов. Эта система обладает высокой эффективностью и удобством использования, что позволяет существенно упростить и ускорить процесс ведения бухгалтерского учета, а также повысить его точность и минимизировать возможность ошибок [5].

В свою очередь, бухгалтерский учет – это упорядоченная система сбора, регистрации и обобщения информации в денежном выражении об имуществе, обязательствах организации и их движении путем сплошного, непрерывного и документального учета всех хозяйственных операций. Основной задачей бухгалтерского учёта является формирование полной и достоверной информации (бухгалтерской отчетности) о деятельности организации и её имущественном положении, необходимой внутренним пользователям бухгалтерской отчетности – руководителям, учредителям, участникам и соб-

ственникам имущества организации, а также внешним – инвесторам, кредиторам и другим пользователям бухгалтерской отчетности [9].

Система была разработана с учетом особенностей учета доходов и расходов самозанятых студентов, что позволяет ее применять не только в университетах, но и в других сферах, где необходим учет доходов и расходов фрилансеров.

Внедрение разработанной системы позволит упростить и ускорить процесс ведения бухгалтерского учета, а также снизить вероятность ошибок при внесении данных. Таким образом, данная система может быть полезна для университетов и других учебных заведений, а также для самозанятых студентов и фрилансеров в целом.

В дальнейшем возможны доработка и усовершенствование системы, в том числе с учетом потребностей других категорий самозанятых граждан.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бергер М.М. Управление проектами разработки программного обеспечения. Москва: Эксмо, 2021. 256 с.
2. Налоговый кодекс Российской Федерации, часть первая от 31.01 1998 №146-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. 1998. №31. Ст. 3824.
3. Поправко И.В. Проблемы бухгалтерского и налогового учета расчетов с самозанятыми // Вестник ВГУ. Серия: Экономика и управление. 2019. №2.
4. Чистов Д.В. Проектирование информационных систем / Д.В. Чистов, П.П. Мельников, А.В. Золотарюк, Н.Б. Ничепорук. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Издательство Юрайт, 2023. 293 с.
5. Шляхов В.С. Разработка информационных систем: Технологии и инструменты. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2019. 96 с.
6. PostgreSQL [Электронный ресурс] URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/postgresql/> (Дата обращения: 11.05.2023).
7. Python [Электронный ресурс] URL: <https://blog.skillfactory.ru/> (Дата обращения: 09.05.2023).
8. Автоматизация бухгалтерского учета [Электронный ресурс] URL: <https://otr-soft.ru/1> (Дата обращения: 12.05.2023).
9. Бухгалтерский учет, определение, задачи, принципы [Электронный ресурс] URL: https://www.audit-it.ru/terms/accounting/bukhgalterskiy_uchet.html (Дата обращения: 07.05.2023).
10. Понятие базы данных [Электронный ресурс] URL: <https://www.oracle.com/> (Дата обращения: 05.05.2023).
11. Разработка пользовательского интерфейса [Электронный ресурс] URL: <https://younglinux.info/htmlcss/intro> (Дата обращения: 07.05.2023).
12. Тестирование систем [Электронный ресурс] URL: <https://daglab.ru/> (Дата обращения: 12.05.2023).
13. Технические требования [Электронный ресурс] URL: <https://www.lcard.ru/> (Дата обращения: 08.05.2023).
14. Учет доходов и расходов [Электронный ресурс]: URL <https://class365.ru/> (Дата обращения: 07.05.2023).
15. Что такое Git? [Электронный ресурс]: URL: <https://www.atlassian.com/> (Дата обращения: 10.05.2023).

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED INFORMATION SYSTEM FOR ACCOUNTING SELF-EMPLOYED STUDENTS

© M.Sh. Mintshev, E.D. Alisultanova, A.A. Midaeva
GSTOU named after acad. M.D. Millionshchikov, Grozny, Russia

This article discusses the development of an automated information system for tracking the income and expenses of self-employed students. In modern society, more and more people are turning to self-employment, and students are no exception. However, tracking income and paying taxes can be a complex and confusing process, especially for young people who are just starting their careers. The article reviews relevant literature, describes the methodology for the research, development, and implementation of the system. The article describes the development process of an automated information system that can help self-employed students manage their income and tax payments. The system provides a convenient interface for entering information about income and expenses, as well as calculating tax payments in accordance with the law.

The article also examines the benefits of using such a system for students and the government as a whole. The system can help students track their income and expenses, allowing them to better plan their budgets. It can also help the government collect tax payments from self-employed students.

The research results showed that the automated information system for tracking self-employed students is highly effective and user-friendly. The article also compares the research results with existing literature and discusses the achieved goals and objectives, advantages, and disadvantages of the developed system. In conclusion, the article notes that the developed system can be useful for universities and other educational institutions, as well as for self-employed students and freelancers in general, and that the system can be further improved and developed in the future.

Keywords: Automated information system, accounting, income, expenses, self-employed students, bookkeeping, freelancers, testing methodology, system development, discussion of results.

REFERENCES

1. Berger, M.M. (2021). *Software Development Project Management*. Exmo Publishing, Moscow, 256 p.
2. (1998). Tax Code of the Russian Federation, Part One of January 31, 1998 №146-FL. Collection of Legislation of the Russian Federation, №31. Art. 3824.
3. Popravko, I.V. (2019). 'Problems of Accounting and Taxation of Self-Employment Settlements' *Vestnik VSU. Series: Economics and Management*. №2.
4. Chistov, D.V., Melnikov, P.P., Zolotaryuk, A.V. and Nicheporuk, N.B. (2023). *Information Systems Design*. 2nd ed., rev. and add Yurayt Publishing, Moscow, 293 p.
5. Shlyakhov, V.S. (2019). *Information Systems Development: Technologies and Tools*. BHV-Peterburg, St. Petersburg, 96 p.
6. PostgreSQL [Electronic resource]: available at: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/postgresql/> (Accessed 11 May 2023).
7. Python [Electronic resource], available at: <https://blog.skillfactory.ru/> (Accessed 09 May 2023)
8. Automation of Accounting [Electronic resource]: available at: <https://otr-soft.ru/1> (Accessed 12 May 2023).
9. Accounting, definition, tasks, principles [Electronic resource]: available at: https://www.audit-it.ru/terms/accounting/bukhgalterskiy_uchet.html (Accessed 07 May 2023).
10. Database concept [Electronic resource]: available at: <https://www.oracle.com/> (Accessed 05 May 2023).
11. User Interface Development [Electronic resource]: available at: <https://younglinux.info/htmlcss/intro> (Accessed 07 May 2023).
12. System Testing [Electronic resource], available at: <https://daglab.ru/> (Accessed 12 May 2023).
13. Technical Requirements [Electronic resource], available at: <https://www.lcard.ru/> (Accessed 08 May 2023).
14. Income and Expense Accounting [Electronic resource]: available at: <https://class365.ru/> (Accessed 07 May 2023).
15. What is Git? [Electronic resource]: available at: <https://www.atlassian.com/> (Accessed 10 May 2023).

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ МИКРОКЛИМАТА ПОМЕЩЕНИЯ ПЕКАРНИ

©А.А-В. Садулаев, М.Р. Исаева, З.Л. Хакимов, Х.Т. Муртазова
ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

В данной статье рассматривается вопрос управления параметрами микроклимата в помещении пекарни. Для автоматического управления работой вентилятора разработана система автоматического регулирования на основе закона пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования. В лабораторных условиях собрана экспериментальная модель автоматического управления работой вентилятора в зависимости от температуры в замкнутом пространстве. В программе MATLAB с помощью библиотеки Simulink разработана математическая модель данной экспериментальной установки. На основании успешно проведенного эксперимента разработан алгоритм, в соответствии с которым разработана программа управления вентилятором.

Ключевые слова. Автоматизированная система управления, регулирование, пекарня, вентилятор, математическая модель.

Формат цитирования: Садулаев А.А-В., Исаева М.Р., Хакимов З.Л., Муртазова Х.Т. Проектирование автоматизированной системы управления параметрами микроклимата помещения пекарни // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XIX, №2. 2023. С. 32-38. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.95.14.004

Хлебобулочные изделия становятся популярными с каждым днем. Люди всех возрастов любят разные хлебобулочные изделия из-за их вкуса, цвета и легкости усваивания. Хлеб является одним из основных продуктов питания. Его готовят на пекарнях путем выпечки теста из муки и воды и других ингредиентов в зависимости от рецепта. Эксплуатация пекарни может быть сложным предприятием с затратами на запуск оборудования, сроками производства, соблюдением правил техники безопасности и технического обслуживания и жесткой местной конкуренцией за клиентов.

Рассмотрим в качестве примера «Пекарню Мураталиева», расположенную в г. Урус-Мартан. Данная пекарня является небольшим предприятием по выпечке различных хлебобулочных изделий: белый хлеб, батон, черный хлеб, лепешки и т.д. В качестве технологического оборудования у данной пекарни используются: тестомеситель, тестоделитель, расстоечные шкафы и шкафы по выпечке хлеба. Для выпечки хлеба используется стандартный метод, т.е. ингредиенты смешивают вместе, чтобы сформировать тесто, и оставляют для броже-

ния от одного до трех часов. В процессе брожения тесто из короткой плотной массы превращается в эластичное тесто. Использование разного количества дрожжей и температуры теста обычно контролирует время брожения. На рисунке 1 представлен план пекарни. Все оборудование находится в одном помещении в разных зонах.

Проведем анализ уровня автоматизации данной пекарни. Начиная от тестомесителя и заканчивая шкафами по выпечке, все оборудование автоматическое. Участие человека заключается лишь в начале работы, а именно в выборе рецептуры теста.

В помещении установлены два вытяжных вентилятора, один в зоне со шкафами по выпечке хлеба, а другой в зоне с расстоечными шкафами. Оба вентилятора работают в ручном режиме, т.е. работники сами включают вентиляторы при превышении температуры выше 29°. Проблема заключается в том, что работники пекарни должны дополнительно следить за работой вентилятора и показаниями термометра помимо своей основной работы. В статье предлагается решение данной проблемы,

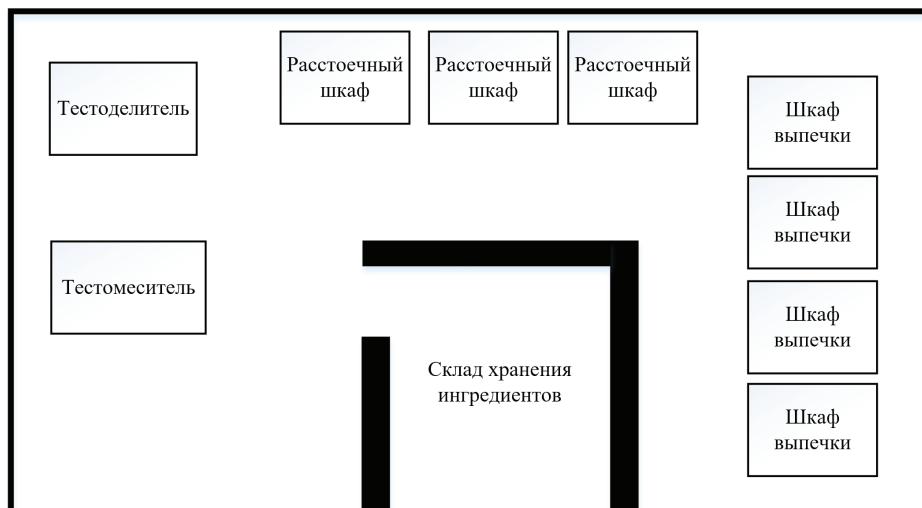


Рис. 1. План пекарни «Пекарня Мураталиева»

которое заключается в переводе режима работы вентилятора с ручного на автоматический.

Для автоматического управления работой вентилятора нужно разработать систему автоматического регулирования. В качестве регулируемого параметра выступает загазованность и температура в помещении, а в качестве исполнительного механизма выступает вентилятор. Чтобы управлять работой вентилятора в зависимости от изменения этих параметров в помещении, нужно подобрать соответствующее управляющее устройство. Для решения этой проблемы выбран программируемый логический контроллер (ПЛК) с дискретными и аналоговыми входами/выходами.

Наиболее распространённым типом регулирования является двухпозиционное и пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) регулирование. С учетом того, что при двухпозиционном регулировании присутствуют колебания технологического па-

раметра, не зависящие от самого регулятора, и наличия аналогового выхода ПЛК, было принято решение использовать ПИД-регулирование вентилятором. На рисунке 2 изображена блок-схема ПИД-регулятора в контуре обратной связи. $r(t)$ – желаемое значение процесса или уставка (SP), а $y(t)$ – измеренное значение процесса (PV).

ПИД-регулятор может быть выполнен в виде программного блока (рис. 3.а) или программного кода (рис. 3.б). Для удобства при создании программы управления ПИД-регулятор будет использоваться как функциональный блок.

Для ПИД-регулятора необходимо задать константы K_p , K_i , K_d , которые называются пропорциональным, интегральным, дифференциальным усилением или коэффициентом соответственно. Для их определения существует множество методов, например, ручная настройка, метод колебаний, метод Куна и т.д. В дан-

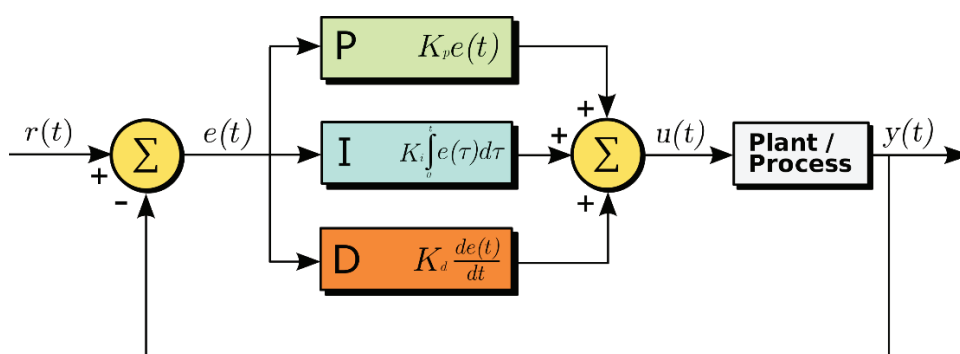


Рис. 2. Блок-схема ПИД-регулятора

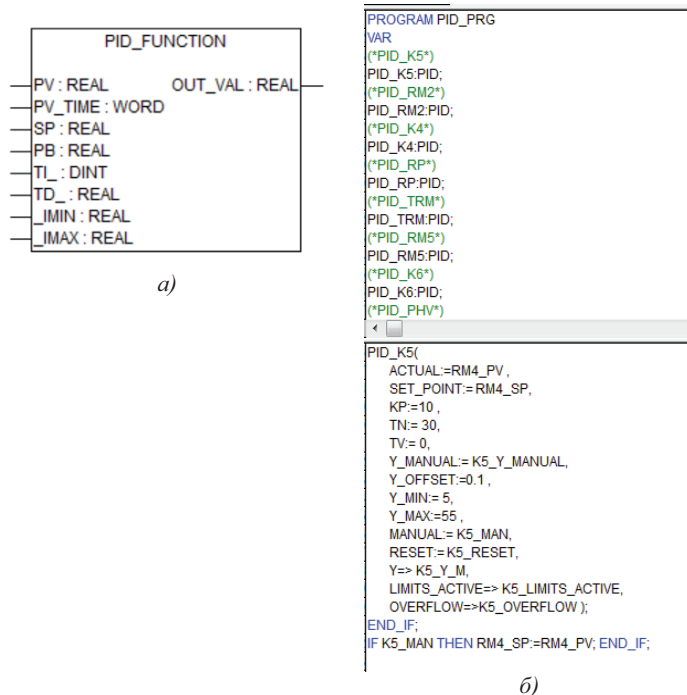


Рис. 3. ПИД-регулятор:
а) программный блок б) программный код

ной статье рассмотрен способ использования физического ПИД-регулятора с автонастройкой для получения необходимых коэффициентов.

Для этого в условиях лаборатории кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» была собрана экспериментальная модель автоматического управления работой вентилятора от температуры в замкнутом пространстве. Структурная схема модели представлена на рисунке 4.

Вентилятор осевой с настенной панелью серии YWF-B-2E-250/2500 об/мин/180 Вт, оснащенный двигателями с внешним ротором

ТТР (твердотельное реле) нужно для включения и выключения цепи с помощью низких напряжений, подаваемых на клеммы управления. При его выборе учитывается номинал и вид управляющего тока, а также значение силы тока нагрузки. С помощью ТТР можно имитировать ШИМ-модуляцию, т.е. осуществлять ПИД-регулирование. ПИД-регулятор был подобран одноканальный с автонастройкой, к которому через ТТР подключен вытяжной вентилятор на 220В.

Главной целью данного эксперимента являлось нахождение коэффициента пропор-

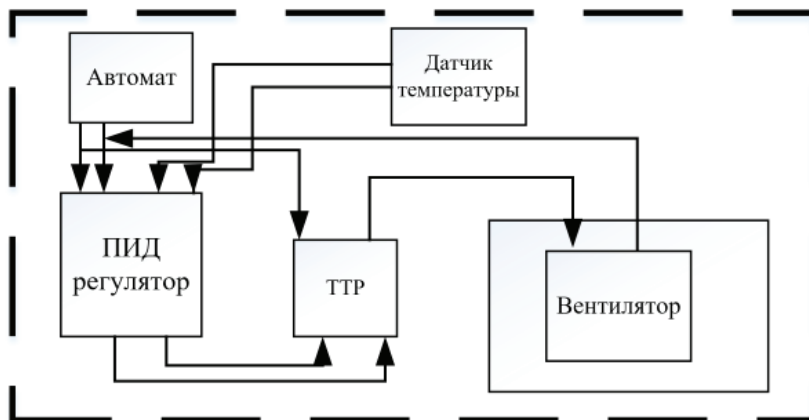


Рис. 4. Структурная схема экспериментальной модели управления работой вентилятора от температуры в замкнутом пространстве

ционального, интегрального и дифференциального с помощью ПИД-регулятора с автонастройкой. Прежде чем приступить к работе с реальными объектами, был рассмотрен и изучен график переходного процесса. Для этого в программе MATLAB с помощью библиотеки Simulink была разработана математическая модель данной экспериментальной установки (рис. 5).

Построенная система является замкнутой с обратной связью, по прямому каналу связи расположены ПИД-регулятор и вентилятор, а по обратному каналу связи – датчик температуры. Полученные в ходе эксперимента коэффициенты K_p , K_i , K_d были записаны в ПИД-регулятор как глобальные переменные. После компиляции данной модели был получен график переходного процесса, представленный на рисунке 6.

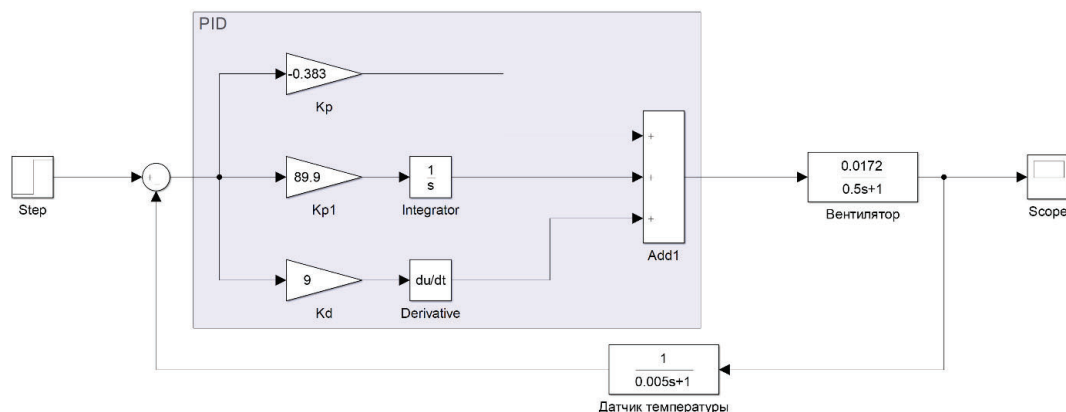


Рис. 5. Математическая модель

С учетом соответствия характеристик прямых показателей качества системы, а именно времени переходного процесса, процента перерегулирования, с заданными можно сделать вывод о том, что система является устойчивой и не требует дальнейшей коррекции. Также была проведена оценка устойчивости системы по критерию устойчивости Ляпунова. Т.е. необходимо, чтобы все корни характеристического уравнения замкнутой системы имели

отрицательные вещественные части. Для этого в командной строке программы MATLAB были заданы передаточные функции ПИД-регулятора W_{pid} , вентилятора W_v и датчика температуры W_t :

```
>> Wpid= tf ( [9-0.383 89.9], [10])
Wpid =
      9 s^2-0.383 s + 89.9
      -----
              s
```

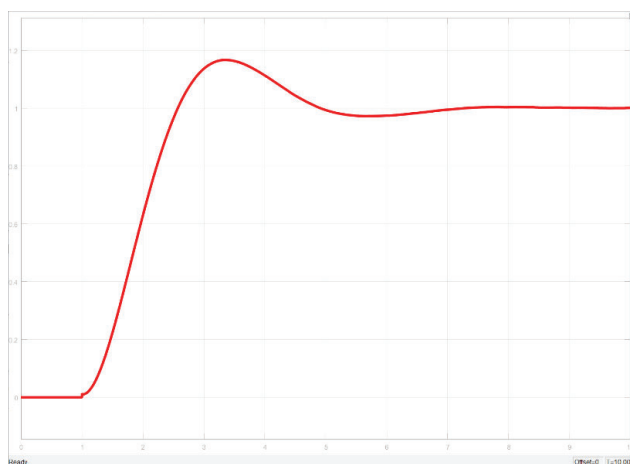


Рис. 6. График переходного процесса


```
>> Wv= tf ([0.0172], [0.5 1])
Wv =
      0.0172
      --
      0.5 s + 1
>> Wt= tf ([1], [0.005 1])
Wt =
      1
      --
      0.005 s + 1
```

Т.к. данная система является замкнутой с отрицательной обратной связью, ее общая передаточная функция находится по следующей формуле:

С начала определяем общую передаточную функцию W_{pidv} по прямому каналу связи:

```
>> Wpidv= series (Wpid,Wv)
Wpidv =
      0.1548 s^2-0.006588 s + 1.546
      --
      0.5 s^2 + s
```

Далее определяем общую передаточную функцию системы:

```
>> Ws=feedback (Wpidv,Wt)
Ws =
      0.000774 s^3 + 0.1548 s^2 + 0.001144 s +
      1.546
      --
      0.0025 s^3 + 0.6598 s^2 + 0.9934 s + 1.546
```

Следовательно, характеристическое уравнение системы имеет следующий вид:

$$Kp = 0.0025s^3 + 0.6598s^2 + 0.9934s + 1.546$$

Корни данного уравнения также были найдены в программе MATLAB с помощью функции roots:

```
>> r= roots (Kp)
r =
- 2.6241 + 0.0000i
- 0.0075 + 0.0134i
- 0.0075-0.0134i
```

Т.к. вещественная часть корней характеристического уравнения отрицательна, можно убедиться в том, что система является устойчивой.

На основании успешности эксперимента был разработан алгоритм, в соответствии с которым разработана программа управления вентилятором (рис. 7).

Таким образом, по итогам описания структурной схемы экспериментальной модели управления работой вентилятора, а также составления ее математической модели, определения значений ПИД коэффициентов настройки регулятора, была разработана управляющая программа для ПЛК.

Разработанная автоматизированная система управления микроклиматом помещения пекарни позволяет независимо от остальных параметров процесса регулировать температуру и контролировать уровень загазованности на рабочем месте. Предлагаемая система управления применима при регулировании микроклимата в аналогичных производствах.

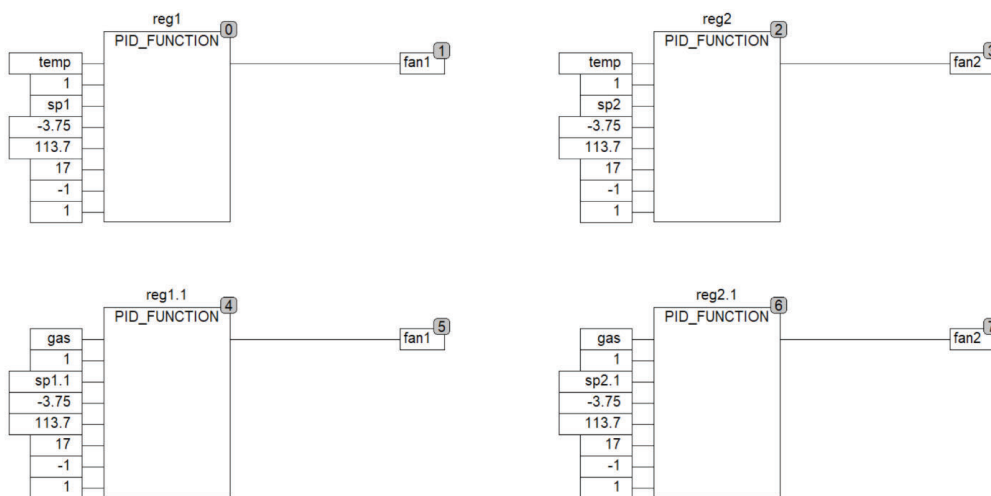


Рис. 7. Программа управления работой вентилятора на языке FBD

ЛИТЕРАТУРА

1. *Петраков Ю. В., Драчев О. И.* Теория автоматического управления технологическими системами: учебное пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2015. 352 с.
2. *Сазонов Г. Г.* Основы теории автоматического управления: учебное пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2015. 236 с.
3. *Шамсадова Я. Ш.* Организация автоматизированной системы научных исследований при контроле и испытаниях станков в структуре системы мониторинга технологического процесса/*Я. Ш. Шамсадова, А. А. Игнатьев, М. Р. Исаева, Х. Р. Визирова* // Вестник ГГНТУ. 2020. Т. 16. № 1. С. 12-18.
4. *Пашаев В. В.* Исследование существующего уровня автоматизации мукомольного производства с целью дальнейшей интеграции в современную АСУТП/*В. В. Пашаев, Ж. Д. Халпиев, Ш. А. Гацаев, М-Ш. М. Садулаев* // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2020. Т. 16. №3. С. 5-11.
5. *Пашаев В. В.* Моделирование системы мониторинга печи обжига клинкера/*В. В. Пашаев, В. В. Шухин, М. С. Насуханов, М. С. Бараев* // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2020. Т. 16. №3. С. 12-18.
6. *Минцаев М. Ш.* Автоматизированная система управления Ханкальской геотермальной станцией с циркуляционной схемой отбора глубинного тепла земли – образовательный аспект/*М. Ш. Минцаев, З. Л. Хакимов, М. А. Лабазанов* // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2022. № 1. С. 31-36.
7. *Бериев И. Р., Минцаев М. Ш.* Информационная система финансового мониторинга и управления деятельностью малых инновационных предприятий // Современные наукоемкие технологии. 2017. №2. С. 7-11.
8. *Тахгириев А. У., Хакимов З. Л., Хакимов А. Л.* Математическое моделирование системы автоматического регулирования температуры в камере инкубатора // Сборник научных материалов Всероссийского научно-практического семинара «Яндаровские чтения». 2020. № 1. С. 73-79.
9. *Топчеев Ю. И.* Атлас для проектирования систем автоматического регулирования: Учеб. пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1989. 752 с.
10. *Бесекерский В. А., Попов Е. П.* Теория систем автоматического регулирования. Издание третье, исправленное. М.: Наука, 1975. 347 с.
11. *Лазарева Т. Я.* Основы теории автоматического управления: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 352 с.
12. *Иванов В. Н.* Математические основы теории автоматического управления. Том 2: учебная литература. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 364 с.
13. *Солодовников В. В.* Автоматизированное проектирование систем автоматического управления. М.: Машиностроение, 1990. 332 с.
14. *Клюев А. С., Товарнов А. Г.* Наладка систем автоматического регулирования котлоагрегатов. М.: Наука, 1970. 314 с.

DESIGN OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR THE PARAMETERS OF THE MICROCLIMATE OF THE BAKERY PREMISES

© A. A-V. Sadulaev, M. R. Isaeva, Z. L. Khakimov, Kh. T. Murtazova

GSTOU named after M. D. Millionshchikov, Grozny, Russia

This article discusses the issue of controlling the parameters of the microclimate in the bakery room. For automatic control of the fan operation, an automatic control system based on a proportional-integral-differential regulator has been developed. An experimental model of automatic control of the fan operation from temperature in a closed space has been assembled in laboratory conditions, a mathematical model of this experimental installation has been developed in the MATLAB program using the Simulink library. Based on the success of the experiment, an algorithm has been developed, according to which a fan control program has been developed.

Keywords. Automated control system, controller, bakery, fan, mathematical model.

REFERENCES

1. Petrakov, Yu.V. and Drachev, O. I. (2015). *Theory of automatic control of technological systems*. Textbook.kov, TNT, Stary Oskol, 352 p.
2. Sazonov, G. G. (2015). *Fundamentals of the theory of automatic control*. Textbook. TNT. Stary Oskol, 236 p.
3. Shamsadova, Ya. Sh., Ignatiev, A. A., Isaeva, M. R. and Vizirova, H. R. (2020). 'Organization of an automated system of scientific research during control and testing of machine tools in the structure of the process monitoring system'. *"Herald of GSTOU. Technical sciences"*. Vol. 16, № 1, pp. 12-18.
4. Pashaev, V. V., Khalpiev, Zh.D., Gatsaev, Sh.A. and Sadulaev, M-Sh.M. (2020). 'Investigation of the existing level of automation of flour milling production with a view to further integration into modern automated control systems'. *"Herald of GSTOU. Technical sciences"*. Vol. 16, № 3, pp. 5-11.
5. Shukhin, V. V., Nasukhanov, M. S., Baraev, M. S. (2020). 'Modeling of the monitoring system of the clinker kiln'. *"Herald of GSTOU. Technical sciences"*. Vol. 16, № 3, pp. 12-18.
6. Mintshev, M. Sh., Khakimov, Z. L. and Labazanov, M. A. (2022). 'Automated control system of the Khankal geothermal station with a circulation scheme for the selection of deep heat of the earth educational aspect'. *Journal "Izvestia of higher educational institutions. The North Caucasus region. Technical Sciences"*. № 1, pp. 31-36.
7. Beriev, I. R. and Mintshev, M. Sh. (2017). 'Information system of financial monitoring and management of small innovative enterprises'. *Journal "Modern science-intensive technologies"*. № 2, pp. 7-11.
8. Takhgiriev, A. U., Khakimov, Z. L. and Khakimov, A. L. (2020). 'Mathematical modeling of the automatic temperature control system in the incubator chamber'. *Collection of scientific materials of the All-Russian scientific and practical seminar "Yandar readings"*. № 1, pp. 73-79.
9. Topcheev, Yu.I. (1989). *Atlas for design automatic control systems*. Textbook for universities. Mechanical Engineering, Moscow, 752 p.
10. Besekersky, V. A. and Popov, E. P. (1975). *Theory of automatic control systems*. Third edition, corrected. Nauka, Moscow, 347 p.
11. Lazareva, T. Ya. (2004). *Fundamentals of the theory of automatic control*. A textbook. 2nd ed., reprint and additional. Publishing House of the Tambov State Technical University. Tambov, 352 p.
12. Ivanov, V. N. (2008). *Mathematical foundations of the theory of automatic control*. Volume 2: educational literature. Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 364 p.
13. Solodovnikov, V. V. (1990). *Automated design of automatic control systems*. Mashinostroenie, Moscow, 332 p.
14. Klyuev, A. S. and Tovarnov, A. G. (1970). *Adjustment of*

ВОДНО-ПАРАФИНОВЫЕ ДИСПЕРСИИ

© Э.А. Александрова¹, Б.Л. Александров¹, Ж.Т. Хадисова^{2,3},
М.Х. Магомадова^{2,3}

¹КубГАУ, Краснодар, Россия

²ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

³ЧГУ им. А.А. Кадырова, Грозный, Россия

Предложен компонентный состав седиментационно устойчивой водно-парафиновой дисперсии (ВПД). В качестве дисперсной фазы ВПД использована пластичная парафино-церезиновая композиция (ПЦК), разработанная на основе исследований температурных и структурно-механических свойств нефтяного парафина и его сплавов с нефтяными церезинами. Для стабилизации ПЦК в водной дисперсионной среде рекомендовано применять поверхностно-активное вещество, обеспечивающее устойчивость водных дисперсий – ВПЦД.

Ключевые слова: водно-парафино-церезиновая дисперсия (ВПЦД), состав, поверхностно-активные вещества, стабилизатор, прочность, пластичность, седиментационная устойчивость, агрегативная устойчивость.

Формат цитирования: Александрова Э.А., Александров Б.Л., Хадисова Ж.Т., Магомадова М.Х. Водно-парафиновые дисперсии // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XIX, №2. 2023. С.39-48. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.22.20.005

Гидрофобные парафиновые композиции (ПК) нашли широкое применение в различных отраслях народного хозяйства: в качестве антикоррозионных покрытий, предохранения сельскохозяйственных объектов от иссушения, защиты плодовых деревьев от вредителей и болезней [3, 5-11]. В тех случаях, когда контакт обрабатываемых объектов с разогретыми ПК недопустим, большой интерес представляют водно-парафиновые дисперсии (ВПД). ВПД является перспективным продуктом в сельском хозяйстве для улучшения сохранности семян и повышения эффективности дальнейшего роста и развития сельскохозяйственных культур. Данный эффект может быть увеличен введением в ВПД специальных средств защиты растений от вредителей и болезней, а также стимуляторов роста. ВПД может служить экологически безопасным эффективным антикоррозионным покрытием сельскохозяйственных машин и металлических агрегатов. Парафиновые дисперсии используются также в электротехнической, абразивной, машиностроительной и других отраслях. Однако создание высокостабильных ВПД, отвечающих определенным требованиям при решении кон-

кретных технологических задач, – довольно сложная научно-техническая проблема.

В связи с указанным основной целью данного исследования являлась разработка состава ВПД агрегативно и седиментационно устойчивой в течение длительного времени, сохраняющей текучесть при повышенном содержании ПК. Решение этой задачи требует многогранного исследования влияния различных факторов (природы парафинсодержащих нефтепродуктов и поверхностно-активных веществ (ПАВ) – эмульгаторов, концентрации дисперсной фазы, температуры, pH среды, интенсивности перемешивания, технологических приёмов смешения и других) на агрегативную устойчивость и плёнкообразующую способность ВПД.

Современное состояние вопроса о водно-парафиновых дисперсиях

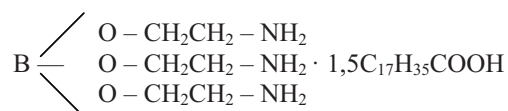
В настоящее время в отечественной промышленности на Оренбургском НПЗ выпускается водно-восковая дисперсия ВВД-2М. Она включает следующие компоненты: парафин – 27% мас., стеариновая кислота – 2,4% мас., этиленгликоль – 1,3% мас., этаноламин – 2,4%

мас., вода (конденсат пара) – 66,9% мас. К недостаткам данной дисперсии следует отнести ее многокомпонентность, различную растворимость отдельных ингредиентов, сложность технологии приготовления, а также ограничение содержания парафина (до 27% мас.), что определяется текучестью товарной дисперсии.

В 1992 году НПВМП «ХИМЕКО» выпустил опытную партию водно-парафиновой дисперсии от коррозии «ТБМ» на Лабинском ПО «Химик» на основании ТУ 0253-002-17197708-93. «ТБМ» представлял собой водную дисперсию твердых парафинов, церезинов или петролатумов и предназначался для защиты от атмосферной коррозии сельскохозяйственных машин и запасных частей к ним, а также изделий машиностроительной промышленности и трубопрокатных заводов из черных, цветных металлов и их сплавов. Требования, предъявляемые к этому составу согласно ТУ, следующие: условная вязкость по вискозиметру ВЗ-246 с диаметром сопла 4 мм (ВЗ-4) при $(100 \pm 0,5)^\circ\text{C}$ – 12-15; показатель рН в пределах 7,5-8,5; массовая доля воды 70-81%; способность сохранять пленку на вертикальной поверхности при 40°C .

Стабилизаторами защитного эмульгатора «ТБМ» служили составы на основе комплексного эмульгатора КС (ТУ 2499-010-17197708-93), представляющего собой комплексную соль жирных кислот и сложных боратов (полторозамещенная соль трибората моноэтаноламина и жирной кислоты).

Химическая формула



Состав эмульгатора КС, % мас.:

борный эфир жирной кислоты	60,0
моноэтаноламин	7,0
вода	13,0
моноэтиленгликоль	20,0

Способ приготовления КС (100 см³). Борный эфир в количестве 60 см³ смешивается с 7 см³ моноэтаноламина. При этом происходит экзотермическая реакция, и смесь нагревается.

Затем при непрерывном перемешивании последовательно добавляется 13 см³ и 20 см³ моноэтиленгликоля. Получается прозрачный состав янтарного цвета. КС был разработан для защиты военной техники в закрытых помещениях путем нанесения парафиновых эмульсий, не содержащих растворителей.

Из научных разработок водно-парафиновых составов следует отметить также исследования и практические предложения Зубковой Н.В. В работе [12] автор рекомендует следующую рецептуру пленкообразующего антикоррозионного водно-воскового нефтяного покрытия, % мас.:

окисленный петролатум	ТУ 38-301196-78	13,9
монта-воск	ТУ 39-1232-76	4,5
ингибитор коррозии-КСК	ТУ 38-401-27-71	0,8
или – МСДА-1К	ТУ 6-02-843-74	
гидроксид аммония	ГОСТ 9-77	0,8
вода		80

Нашими исследованиями [7, 8] показано, что ВПД может быть также получена при следующем составе ингредиентов, % мас.:

Парафин	35-50
Водорастворимый полимер (ПВС, КМЦ)	0,5-3,0
ПАВ	0,3-2,0
Водорастворимая соль алюминия	1,0-3,0
Вода	45,5-77,6

Этот состав предупреждает растрескивание соцветий лука, чеснока и осыпания созревших семенников, позволяет обеспечить одноразовую механизированную их уборку, а также предупреждает высыхание плодов при их хранении.

Для сравнительного анализа стабилизаторов масляных дисперсий в воде представляет интерес состав минерально-масляной эмульсии (Препарата-30) – ТУ 2441-183-00209252-2002, используемого для защиты растений.

Составные компоненты Препарата-30:

- лигносульфонат технический порошкообразный (ЛСТ-П) – ТУ 54-028-00279580-97
- мучнистый порошок;
- неолы АФ 9-10, АФ 9-12 – ТУ 2483-077-05766801-98 – прозрачная маслянистая жидкость от бесцветной окраски до светло-желтого цвета;
- дисольван 4411 – блоксополимер окисей этилена и пропилена – деэмульгатор обратных

эмульсий, эффективный эмульгатор эмульсий первого рода.

На основе приведенного выше литературного материала можно сделать следующие выводы. Вопрос научного обоснования применяемых эмульгаторов в водно-парафиновых дисперсиях практически не проработан, в связи с чем эмульгаторы используются различными авторами разные, без критического анализа их преимуществ и недостатков. Технология приготовления ВПД в литературе не освещается. Сравнительная характеристика известных из литературы водно-парафиновых дисперсий до сих пор не проводилась. В технических условиях на ВПД не приводится методика оценки устойчивости, а также количественные характеристики однородности образованных ими покрытий. Как показали предварительные эксперименты, ВПД часто содержит пузырьки воздуха, что отрицательно сказывается на однородности покрытия.

Разработка состава парафино-церезиновой композиции в качестве дисперсной фазы водно-парафиновой дисперсии

Определив требования к защитным парафинсодержащим покрытиям для различных поверхностей, нами показана необходимость модифицирования дисперсной структуры па-

рафина другими твердыми углеводородами нефти и ПАВ для улучшения водопаропроницаемости, а также адгезии к поверхности. Проведены исследования эксплуатационных свойств парафина (температура плавления, водопаропроницаемость, прочность, пластичность) в зависимости от добавок к нему церезина, воска и фракции $C_{17}-C_{20}$ синтетических жирных кислот (СЖК).

Возможность определенного воздействия на ряд эксплуатационных, в том числе физико-химических, показателей качества парафинов путем добавок в них церезинов, восков и других продуктов была показана нами в работах [1, 2, 4, 14]. Имеются также разработки парафино-восковых композиций для ряда отраслей народного хозяйства, в том числе питомниководческих хозяйств, пищеперерабатывающей, тароупаковочных и др.

Композиции парафина с церезинами и нефтяными восками готовились путем их совместного плавления при температуре, превышающей температуру затвердевания церезинов t_3 на 20 градусов. Как видно из результатов исследований (рис. 1), с увеличением содержания более высокомолекулярного высокоплавкого добавляемого к парафину компонента величина t_3 смеси закономерно возрастает, а степень повышения t_3 при этом уменьшается.

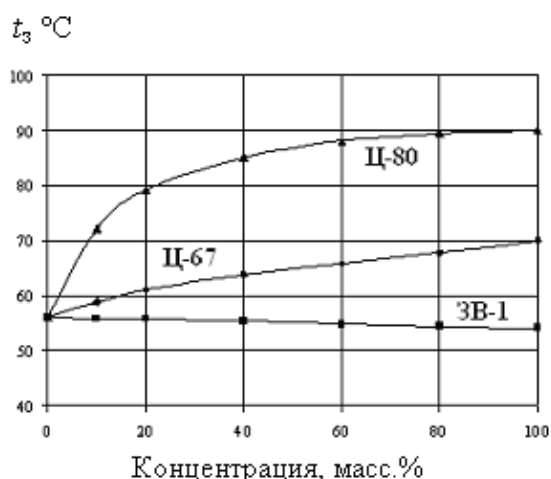


Рис. 1. Зависимость температуры застывания (t_3) парафино-церезиновых композиций от их состава: 1 – Ц-80; 2 – Ц-67; 3 – ЗВ-1

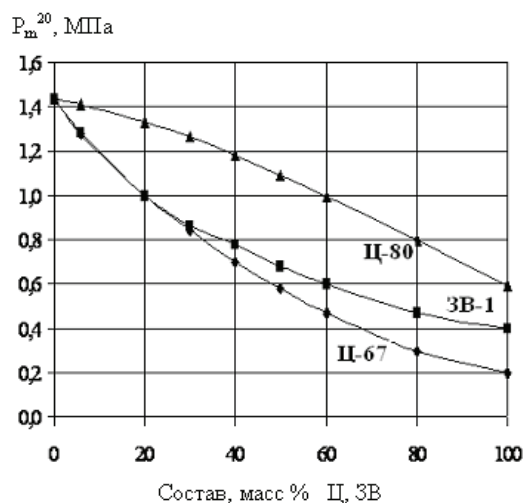


Рис. 2. Зависимость прочности P_m^{20} дисперсных структур сплавов парафина (П) с нефтяными церезинами (Ц) и защитным воском (ЗВ) от их состава: 1 – Ц-67 2 – ЗВ-1 3 – Ц-80

Церезины Ц-67 и Ц-80, превосходящие по температуре плавления твердый парафин, повышают температуру плавления сплава по сравнению с чистым парафином. Нефтяной воск ЗВ-1 имеет температуру застывания (t_3), весьма близкую к температуре плавления t_s парафина, поэтому температура плавления соответствующей парафино-восковой композиции практически совпадает с температурой плавления парафина.

Деформационно-прочностные свойства парафиновых сплавов с нефтяными церезинами (Ц-67 и Ц-80) и защитным воском (ЗВ-1) представлены на рисунке 2. Как видно, компаундирование твердого парафина с другими парафинсодержащими нефтепродуктами Ц-67, Ц-80 и ЗВ-1 способствует понижению величины прочности P_m^{20} дисперсной структуры получаемых сплавов, так как добавляемые продукты имеют показатель прочности P_m^{20} меньше, чем сам парафин (рис. 2).

Во всех исследованных случаях весьма несовершенная разупорядоченная кристаллическая мелкокристаллическая структура церезинов и восков, содержащих более половины изо- и цикло-алканов, а также очень широкий спектр гомологов n-алканов, разупрочняет сплавы. Наиболее значительно снижает вели-

чину P_m^{20} парафина церезин Ц-67 и воск – ЗВ-1. При этом до 40% мас. эти модификаторы одинаково разупрочняют дисперсную структуру парафина, и графическая зависимость в этом случае приближается к линейной.

Церезины и воски, как видно из данных рисунка 3, являются также пластификаторами дисперсной структуры парафина.

По степени убывания пластифицирующего воздействия на твердый парафин, оцениваемого величиной ϵ_m/P_m , исследованные нефтяные модификаторы структуры располагаются в следующий ряд: Ц-67, воск ЗВ-1, церезин Ц-80. Эти нефтепродукты наиболее эффективно увеличивают пластичность при концентрациях их в сплаве выше 50% мас. До 20% мас. их влияние относительно небольшое (рис. 3).

Водопаропроницаемость (ВПП). Из рисунка 3 видно, что лучшим пластификатором парафина является церезин Ц-67. Поэтому изучали влияние на водопаропроницаемость парафиновой композиции от содержания в нем церезина Ц-67 (рис. 4).

Как видно из рисунка 4, наибольшее влияние на водопаропроницаемость оказывает содержание церезина Ц-67 до 15-20% мас. Поэтому рекомендуемый диапазон использования церезинов в композиции 15-20% мас.

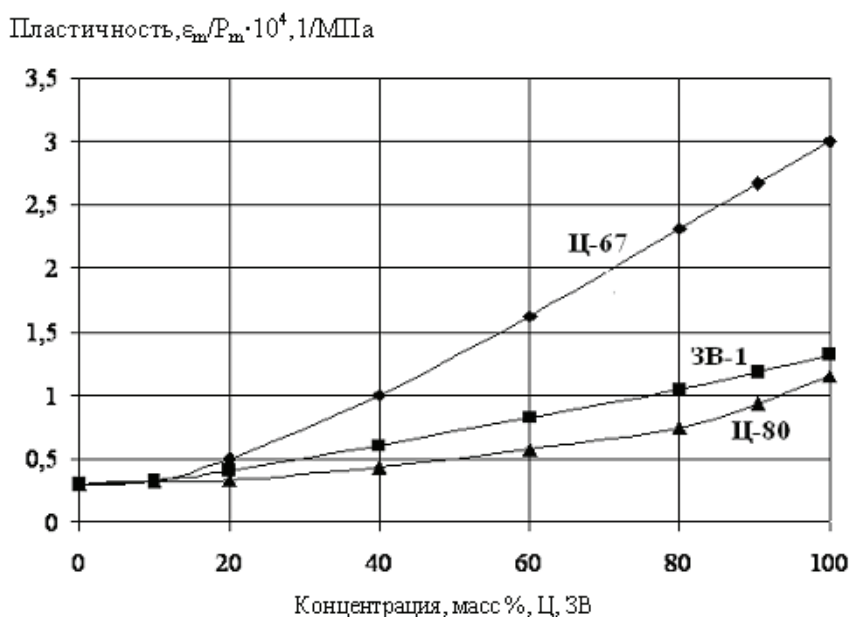


Рис. 3. Зависимость величины пластичности (ϵ_m/P_m) дисперсной структуры сплавов твердого парафина (П) с нефтяными церезинами (Ц-67, Ц-80) и защитными восками (ЗВ-1) от их состава: 1 – Ц-67; 2 – ЗВ-1; 3 – Ц-80

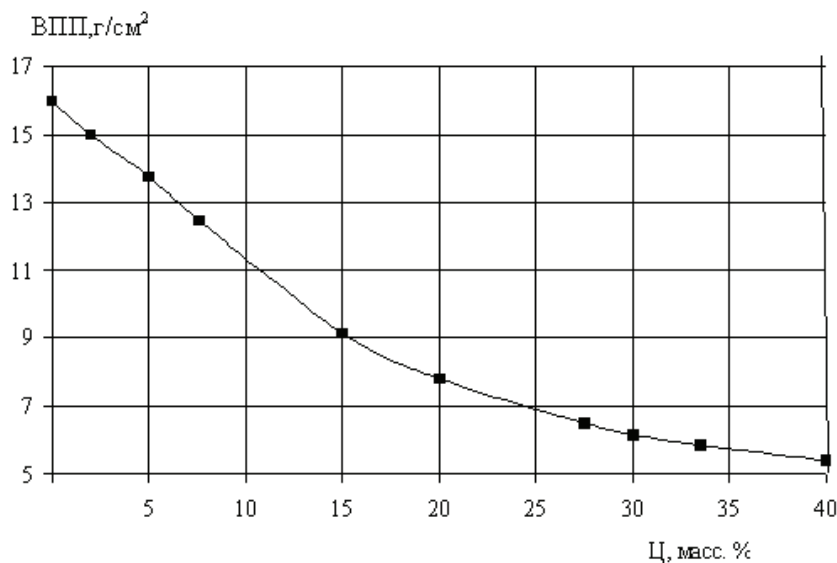


Рис. 4. Зависимость водопаропроницаемости (ВПП) парафино-церезиновой композиции (ПЦК) от содержания в ней церезина (Ц-67)

Адгезия. В настоящее время нет единой теории явления адгезии, и нет стандартных методов измерения адгезионных сил. Как основная оценка величины адгезии нами было использовано свойство водопаропроницаемости. Церезин при содержании его в композиции до 15-20% мас. способствует повышению адгезии. Для улучшения адгезионных сил парафиновых покрытий к поверхности растительных систем важной составляющей парафиносодержащего сплава должны быть поверхностно-активные вещества (ПАВ), обеспечивающие уравнивание неполярности парафина и полярной поверхности.

На практике при выборе компонентов, улучшающих адгезию, чаще всего пользуются лишь практическим опытом.

В качестве модификаторов, улучшающих адгезию и повышающих пластичность парафинов, рекомендуется использовать поверхностно-активные вещества, в частности синтетические жирные кислоты (СЖК) [1, 4].

Графические зависимости свойства (T_s , P_m , ВПП) – состав для парафиносодержащих композиций – позволяют сделать следующие выводы по подбору компонентного состава защитных парафиновых композиций.

1. Для снижения величины водопаропроницаемости защитных покрытий к парафину следует добавить церезин, отличающийся бо-

лее мелкокристаллической структурой и повышенной пластичностью. Церезин следует выбирать наиболее легкоплавкий. Из промышленных марок это церезин 65-67 с $t_s = 65-67^\circ\text{C}$. Концентрацию церезина в композиции целесообразно обеспечить в пределах 10-25 мас. %.

2. В качестве ПАВ, улучшающей адгезию покрытия к полярной поверхности растительной системы, рекомендуется использовать достаточно экономичную и хорошо растворимую в парафине, как в жидком, так и в твердом состоянии, фракцию С17-С20 СЖК в количестве 0,5 мас. %.

На основании изложенного предлагается следующий состав парафиносодержащей композиции (ПК): Ц-65- 20 мас.%; ПАВ – 0,5 мас.%; парафин – 84,5-79,5 мас. %.

Разработка состава водно-парафиновой дисперсии

Были проведены исследования прочностных и упруго-пластических свойств бинарных смесей парафина марки «Т» с температурой плавления 52°C с церезином Ц-67, что позволило научно обоснованно выбрать в качестве твердой фазы парафино-церезиновую композицию (ПЦК) (4:1) с температурой плавления 60°C .

Были исследованы несколько эмульгаторов, и в результате был рекомендован комплексный эмульгатор (КС), представляющий собой ком-

плексную соль жирных кислот и сложных боратов (полуторозамещенная соль трибората моноэтаноламина и жирной кислоты). Благодаря эмульгатору ВПД, разбавленная водой до 10, 20, и 30%-го содержания ПЦК, сохраняла свою стабильность.

В ходе экспериментальных работ было исследовано влияние на текучесть и стабильность ВПД следующих факторов:

- содержания эмульгатора;
- концентрации ПЦК в составе ВПД.

Базой сравнения служили различные варианты водно-восковой дисперсии ВВД-2М, приготовленные по известной технологии. Для приготовления дисперсий использовали лабораторную лопастную мешалку ($\varnothing=45$ мм) с регулируемым числом оборотов. Технология приготовления ВПД на основе КС отличалась от ВВД-2М простотой и состояла в растворении эмульгатора в ПК при 70°C с последующим добавлением расчетного количества предварительно подогретой воды. Полученную дисперсию перемешивали в различных режимах до полного остывания. Качество получаемых дисперсий оценивали по внешнему виду, консистенции (текучести), наличию неоднородностей в виде твердых крупинок ПК или пузырьков воздуха, а также стабильности их водных растворов различной концентрации. Стабильность дисперсии оценивалась по времени отслаивания 2% мас. воды в нижней части дисперсии.

Для экспериментальных работ были использованы следующие образцы эмульгаторов:

- КСО – полуторозамещенная соль трибората моноэтаноламина и олеиновой кислоты;
- КСОН – смесь КСО с неонолом АФ₉₋₁₂ в соотношении 5: 1 (темная высоковязкая жидкость);
- КСС – полуторозамещенная соль трибората моноэтаноламина и стеариновой кислоты;
- КССН – смесь КСС с неонолом АФ₉₋₁₂ в соотношении 5: 1 (твердообразная полусыпучая комковатая масса светло-коричневого цвета);
- КСС-1-50% мас. раствор КСС в парафине (твердообразная однородная масса, быстро растворяющаяся в нагретом парафине).

Технология приготовления ВПД. Общим для всех составов являлась температура нагрева ингредиентов, растворения ПАВ и смешения парафина с водой ($80-85^{\circ}\text{C}$), а также диспергирование парафиновой дисперсии лабораторной мешалкой с лопастью $\varnothing 35$ мм при скорости вращения вала 2200 об/мин в течение 10 минут с последующим ламинарным перемешиванием до полного остывания композиции.

Изучены три состава:

1. Состав, аналогичный компонентному составу минерально-масляной эмульсии (Препарат-30);
2. Состав, аналогичный водно-парафиновой дисперсии ВВД-2М;
3. Состав на основе комплексного эмульгатора КС, аналогичный «ТБМ».

Технология приготовления заключалась в следующем. Эмульгатор растворялся в нагретом парафине, затем либо парафин вводился в воду, либо вода в парафин. Режим перемешивания на первом этапе и температура отдельных ингредиентов были аналогичны указанным выше. Исследования проведены на дисперсиях с концентрацией парафина от 25 до 40% мас. и содержанием эмульгатора 3-5% мас.

По проведенным исследованиям можно сделать следующие выводы:

- эмульгатор КС, синтезированный на основе стеариновой кислоты, имеет неоспоримые преимущества перед эмульгатором на основе олеиновой кислоты, хотя в последующем трудно растворяется в парафине;
- смешение КС с неонолом не приводит к увеличению устойчивости парафиновой дисперсии и является причиной более интенсивного пенообразования;
- наиболее стабильными оказались дисперсии с содержанием эмульгатора 5% мас.;
- основное влияние на нестабильность получаемых результатов оказывала не общая температура синтеза, а разность температур отдельных ингредиентов;
- вместо режима эмульгирования при приготовлении дисперсии был использован режим «ламинарной воронки» без насыщения ее пузырьками воздуха, что исключило пенообразование на промежуточной стадии;

– для обеспечения равномерности эмульгатора КС на основе стеариновой кислоты решено выпускать его в виде 50% мас. раствора в парафине;

– проведенные эксперименты показали, что разбавление КС парафином не требует увеличения общего количества добавки и составляет 2,5% мас. на действующее вещество.

Эмульгатор КС является наиболее перспективным в области производства и применения водно-парафиновых (восковых, церезиновых и т.д.) дисперсий (эмульсий) в различных отраслях народного хозяйства. Возможность получения более концентрированных дисперсий с КС (40% мас. парафина) свидетельствует о более высокой ее стабилизации по сравнению с ВВД-2М.

В таблице 1 представлены результаты исследований различных модификаций эмульгатора КС на стабильность ВПД. Исследования проведены на ВПД с содержанием ПК-25% мас., содержанием КС-5% мас.

Очевидно, что ВПД с КС, синтезированным на основе стеариновой кислоты (КСС, КСС-1), имеют более высокую стабильность по сравнению с ВПД с КС на основе олеиновой кислоты (КСО, КСО-1). Однако КСС твердообразный продукт, и требуется длительное время для его растворения в нагретой среде ПК. В связи с этим в дальнейших исследованиях данный эмульгатор синтезировался в виде 50% мас. растворов в парафине (КСС-1). Это позволило ускорить процесс приготовления дисперсии и исключить пенообразование на промежуточной стадии приготовления ВПД. Кроме того, использование разбавленной товарной формы эмульгатора позволило существенно повысить его эффективность за счет снижения его количества в составе ВПД приблизительно в 2 раза (таблица 2).

Предельно возможное содержание ПК в различных дисперсиях было проверено на смеси парафина с церезином в соотношении 4: 1.

Таблица 1

Влияние типа комплексного эмульгатора на стабильность ВПД

Показатели качества	Вид эмульгатора				
	КСО	КСО-1	КСС	КСС-1	КССН
Наличие частичек парафина, (+,-)	+	+	-	-	-
Наличие пузырьков воздуха, (+,-)	-	+	-	+	-
Стабильность, час	3,0	3,5	неограниченна во времени	4,0	неограниченна во времени

Таблица 2

Влияние количества эмульгаторов КСС и КССР на стабильность водных дисперсий ПК (содержание ПК-20%)

Показатели качества	Количество эмульгатора, % мас.								
	КСС					КСС-1			
	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0	1,0 (д.в)*	2,0 (д.в)	2,5 (д.в)	3,0 (д.в)
Наличие частичек парафина, (+,-)		+	-		-		-		-
Стабильность, час	0,3	2,0	4,0	7,5	>3мес.	2,0	6,0	12,0	>3мес.

* - действующее вещество (д.в.).

Влияние содержания парафина на подвижность его водных дисперсий.

Результаты исследования влияния концентрации ПК в ВПД на её текучесть представлены в таблице 3. Как видно из данных таблицы 3, изменение содержания ПК в дисперсии ВВД-2М мало влияет на её текучесть. Содержание в ней 27% мас. ПК следует считать предельно возможным. Это говорит о недостаточной стабилизации тонкодисперсных частиц парафина, используемого в составе ВВД-2М. В то же время, использование в качестве эмульгатора КССР позволяет увеличить содержание ПК до 40% мас. с сохранением текучести. Возможность получения более концентрированных дисперсий свидетельствует о более высокой их стабилизации по сравнению с ВВД-2М.

На основании приведенных выше результатов экспериментальных исследований нами рекомендуется новый компонентный состав ВПД. В качестве твёрдой фазы следует применять ПК с температурой плавления 60°C. В качестве стабилизатора рекомендуется эмульгатор (КС), представляющий собой комплексную соль жирных кислот и сложных боратов (полуторозамещенная соль трибората моноэтаноламина и жирной кислоты). Данный эмульгатор позволил создать агрегативно и седиментационно устойчивую ВПД, сохраня-

ющую текучесть при содержании ПК до 40% мас. Разработанная ВПД, разбавленная водой до 30, 20, и 10%-го содержания ПК, продолжала сохранять свою стабильность в течение длительного времени. Большую роль в создании стабильной ВПД играют технологические параметры (температура, режим перемешивания и порядок ввода компонентов). Эти исследования будут проведены в последующей работе.

Заключение

1. Разработан компонентный состав водно-парафиновой дисперсии (ВПД), применяемой в качестве защитных гидрофобных покрытий для улучшения сохранности различных сельскохозяйственных систем.
2. При получении достаточно прочных и одновременно пластичных пленок ВПД в качестве дисперсной фазы предложен состав парафино-церезиновой композиции (ПЦК).
3. Для эффективной стабилизации ВПД рекомендован эмульгатор – комплексная соль трибората моноэтаноламина и стеариновой кислоты.
4. Установлено, что рекомендованный эмульгатор позволяет создать агрегативно и седиментационно устойчивую ВПД, сохраняющую текучесть при содержании ПЦК до 40% мас.

Таблица 3

Влияние содержания ПК на подвижность их водных дисперсий

Показатели качества	Концентрация ПК в водной дисперсии, % мас.							
	ВВД-2М				ВПД на основе КССР (3% мас. д.в)			
	20	23	25	27	30	35	40	45
Внешний вид	Мало текучая однородная жидкость	Мало текучая однородная жидкость	Мало текучая однородная жидкость	Не текучая жидкость типа густых сливок	Хорошо текучая эластичная жидкость	Хорошо текучая эластичная жидкость	Хорошо текучая эластичная жидкость	Мало подвижная жидкость типа густых сливок

ЛИТЕРАТУРА

1. *Александрова Э.А.* Влияние поверхностно-активных веществ на температуры кристаллизации и застывания парафина в растворителях различной природы / *Э.А. Александрова, Б.Л. Александров, Ж.Т. Хадисова, Х.Х. Ахмадова, Л.Ш. Махмудова* // Химия и технология топлив и масел. 2022. №4 (632). С. 33-38.
2. *Абубакарова А.С.* Исследование структурно-механических свойств парафинсодержащих нефтепродуктов / *А.С. Абубакарова, Ж.Т. Хадисова, Э.А. Александрова, Б.Е. Красавцев* // Химия и технология топлив и масел. 2014. №2 (582). С. 38-42.
3. *Кукурдидзе Э.Ж., Голубев В.Н., Гусар В.Д.* «Защитные покрытия – антисептик для плодоовощного сырья // Пищевая промышленность. 1990. №10. С. 51-52.
4. *Ахмадова Х.Х.* Основные способы модификации битумов различными добавками / *Х.Х. Ахмадова, Ж.Т. Хадисова, Л.Ш. Махмудова, З.А. Абдулмежидова, М.А. Мусаева* // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2019. Т. 15. №3 (17). С. 42-56.
5. Пат. на изобретение РФ №2349072, Способ некорневой подкормки озимой пшеницы / *Александрова Э.А., Гергаулова Р.М., Шрамко Г.А., Шишкова О.С.* – заявл. 20.03.2009.
6. Пат. на изобретение РФ №2355160. Способ некорневой подкормки плодовых семечковых культур / *Александрова Э.А., Дорошенко Т.Н., Гергаулова Р.М., Шрамко Г.А.*, заявл. 02.07.2007; опубл. 20.05.2009.
7. Пат. №2284685 РФ. Состав для хранения луковиц чеснока / *Э.А. Александрова, Г.М. Наумова*; заявл. 18.04. 2005, опубл. 10.10. 2006.
8. Пат. №2191498 РФ Состав для предупреждения осыпания семенников лука и чеснока и защиты сельскохозяйственных продуктов при их хранении / *Э.А. Александрова, В.Е. Ахрименко, Г.М. Наумова, С. Г. Лукомец*; заявл. 09.01.1999; опубл. 27.10.2002.
9. Патент на изобретение РФ №2155480. Парафиновые покрытия плодовых и виноградных черенков / *Александрова Э.А., Дорошенко Т.Н., Гергаулова Р.М.* Заявл. 10. 02.1998, опубл. 10. 09. 2000.
10. *Переверзев А.Н., Киприянова Е.Н.* Парафиновые композиции. Обзорная информация. М: Химия, 1990. 370 с.
11. Разработка и исследование защитных покрытий на нефтяной основе / *И.А. Тимохин, Н.П. Спиркина, Н.В. Зубкова, Л.П. Зубанова* // Сборник трудов МИНХ и ГП им. И.М. Губкина. 1983. Вып. 172. С. 144-151.
12. *Сульженко Н.В., Слесарь Н.Л.* Сохраняемость плодов перца, обработанных композициями на основе поливинилового спирта // Пищевая и перерабатывающая промышленность. 1987. №6. С. 40-42.
13. *Хадисова Ж.Т., Александрова Э.А., Фадеева Т.П.* Эксплуатационные свойства товарных парафинов разного углеводородного состава // Химия и технология топлива и масел. 2004. №3. С. 45-47.
14. *Широков Е.П., Полегаев В.И.* Хранение и переработка плодов и овощей. М.: Агропромиздательство, 1989. 432 с.

WATER-PARAFFIN DISPERSIONS

© E.A. Alexandrova¹, B.L. Alexandrov¹, Zh.T. Khadisova^{2,3}, M.Kh. Magomadova^{2,3}

¹ Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

²GSTOU named after M.D. Millionshchikov, Grosny, Russia

³ CSU named of A.A. Kadyrov, Grozny, Russia

The component composition of sedimentation-stable water-paraffin dispersion (VPD) is proposed. A plastic paraffin-ceresine composition (PCC) developed on the basis of studies of the temperature and structural-mechanical properties of petroleum paraffin and its alloys with petroleum ceresines was used as the dispersed phase of the VPD. To stabilize the PCC in an aqueous dispersion medium, it is recommended to use a surfactant that ensures the stability of aqueous dispersions - VPCD.

Keywords: water-paraffin-ceresine dispersion (VPCD), composition, surfactants, stabilizer, strength, plasticity, sedimentation stability, aggregative stability.

REFERENCES

1. Alexandrova E.A. Alexandrov B.L., Khadisova Zh.T., Akhmadova H.Kh. and Makhmudova L.Sh. (2022) 'Influence of surface-active substances on the temperature of crystallization and solidification of paraffin in solvents of various nature'. *Chemistry and technology of fuels and oils*. №4 (632), pp. 33-38.
2. Abubakarova A. S., Khadisova, Alexandrova, E. A. and Krasavtsev B. E. (2014), 'Investigation of structural and mechanical properties of paraffin-containing petroleum products'. *Chemistry and technology of fuels and oils*. №2 (582), pp. 38-42.
3. Kukuridze, E.Zh., Golubev, V.N. and Gusar, V.D. (1990) 'Protective coatings - an antiseptic for fruit and vegetable raw materials' *Food industry*. №10, pp. 51-52.
4. Akhmadova, Kh.Kh. Khadisova, Zh.T., Makhmudova, L.Sh., Abdulmezhidova, Z.A. and Musaeva, M.A. (2019) 'The main methods of modifying bitumen with various additives'. *Herald of GSTOU. Technical science*. V.15, №3 (17), pp. 42-56.
5. Aleksandrova E.A., Gergaulova R.M., Shramko G.A., Shishkova O.S. dec. 03/20/2009. *Method of foliar feeding of winter wheat*. Pat. for the invention of the Russian Federation, №2349072
6. Alexandrova E.A., Doroshenko T.N., Gergaulova R.M., Shramko G.A., Appl. 07/02/2007, publ. 05/20/2009. *The method of foliar feeding of fruit pome crops*. Pat. for the invention of the Russian Federation, №2355160.
7. Alexandrova E.A., Naumov G.M. dec. 18.04. 2005, publ. 10.10. 2006. *Composition for storage of garlic bulbs*. RF. Pat. №2284685.
8. Alexandrova E.A., Akhrimenko V.E., Naumova G.M., Lukomets S.G. Dec. 01/09/1999, publ. October 27, 2002. *Composition for preventing shedding of onion and garlic testicles and protecting agricultural products during their storage*. Pat. of the Russian Federation. №2191498.
9. Aleksandrova E. A., Doroshenko T. N., Gergaulova R.M. Appl. 10. 02.1998, publ. 10.09.2000. *Paraffin coatings of fruit and grape cuttings*. Patent for the invention of the Russian Federation, №2155480,
11. Pereverzev, A.N. and Kipriyanova, E.N. (1990). paraffin compositions. Overview information. Chemistry. Moscow, 370p.
12. Timokhin, I.A., Spirkina, N.P., Zubkova, N.V. and Zubanova, L.P. (1983) Development and research of oil-based protective coatings. *Proceedings of the MP and GI named after I.M. Gubkin*. Issue 172, pp. 144-151.
13. Sulzhenko N.V. and Locksmith, N.L. (1987). 'Preservation of pepper fruits treated with compositions based on polyvinyl alcohol'. *Food and processing industry*. №6. P. 40-42.
14. Khadisova, Zh.T., Aleksandrova, E.A. and Fadeeva, T.P. (2004). 'Operational properties of commercial paraffins of different hydrocarbon composition'. *Chemistry and technology of fuel and oils*. №3, pp. 45-47.
15. Shirokov, E.P. and Polegaev, V.I. (1989). *Storage and processing of fruits and vegetables*. Agro-industrial publication. Moscow. 432 p.

БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИКИ И КИНЕТИКИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

© В.М. Зароченцев, А.Л. Рутковский, И.И. Болотаева

СКГМИ (ГТУ), Владикавказ, Россия

В работе приведены результаты анализа процессов, протекающих в металлургических аппаратах, описываемых термодинамическими и кинетическими закономерностями. Математическое описание приведенных ниже процессов представлено в различных литературных источниках, но зачастую позволяет описывать только отдельные химические реакции, материальные балансы или процессы теплопередачи. При этом в большинстве случаев разрозненное математическое описание невозможно объединить в единую систему, позволяющую комплексно их рассматривать и выполнять расчеты металлургических аппаратов.

Расчет термодинамических показателей химических взаимодействий позволяет определить движущую силу и направление протекания реакций. Тепловые и материальные потоки находятся в режиме свободного тепло-массообмена между компонентами реакционной смеси, стенками аппарата и окружающей средой, образуя систему нелинейных уравнений, которая может быть решена только численными методами. Для создания программно-математического описания процессов в современных системах моделирования, автоматизированного проектирования и SCADA широко применяются блочно-модульные методы, позволяющие объединять разнообразие компоненты в единую систему, вследствие чего рассмотрено блочно-модульное моделирование основных механизмов протекания химических реакций взаимодействия в гомогенной и гетерогенной среде с учетом влияния скорости перемешивания и температуры.

Ключевые слова: блочно-модульное моделирование, термодинамика, кинетика, физико-химические превращения, скорость реакции.

Формат цитирования: Зароченцев В.М., Рутковский А.Л., Болотаева И.И. Блочно-модульное моделирование термодинамики и кинетики физико-химических превращений // Вестник ГГНТУ. Технические науки. №2. Том XIX. 2023. С. 49- 56. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.95.67.006

Моделирование металлургических процессов цинкового производства обусловлено особенностями их проведения в растворах и газах при взаимодействии с твердыми сыпучими материалами: концентрат, огарок, кек и др. [1, 2]. Процессы в газах, как правило, сопровождаются экзотермическими реакциями с большим тепловыделением и высокими температурами: обжиг в кипящем слое, сушка и вальцевание кеков; а процессы в растворах (выщелачивание, отстаивание и сгущение, электролиз) проходят с применением внешнего нагрева или охлаждения: паром, воздухом, чистой водой [3]. В основном эти процессы проводятся в непрерывном или полунепрерывном стационарном режиме, при этом реактор можно разбить на условные зоны (ячейки) с равномерно распределенными параметра-

ми, т.е. находящимися в режиме идеального смешения [4].

Математическое описание приведенных выше процессов представлено в различных литературных источниках, но зачастую позволяет описывать только отдельные химические реакции, материальные балансы или процессы теплопередачи. При этом в большинстве случаев разрозненное математическое описание невозможно объединить в единую систему, позволяющую комплексно их рассматривать и выполнять расчеты металлургических аппаратов [5, 6, 7].

В проведенном исследовании при моделировании металлургических процессов были выделены следующие особенности и закономерности:

1. Потоки вещества через реакционную

ячейку подчиняются закону сохранения вещества выражающемуся уравнениями материального баланса.

2. Химические реакции описываются закономерностями макрокинетики и стехиометрическими соотношениями.

3. Реакционная среда может быть разбита на зоны, описываемые моделями идеального смешения для всех компонентов потоков веществ, проходящих через ячейку.

4. Отклонение модели от реального процесса приводит к нарушению расчета материальных балансов и других параметров процесса.

5. Определение коэффициентов модели по результатам реального процесса позволяет повысить ее адекватность.

6. Расчет термодинамических показателей химических взаимодействий позволяет определить движущую силу и направление протекания реакций.

7. Тепловые и материальные потоки находятся в режиме свободного тепло-массообмена между компонентами реакционной смеси, стенками аппарата и окружающей средой, образуя систему нелинейных уравнений, которая может быть решена только численными методами.

8. Для создания программно-математического описания процессов в современных системах моделирования, автоматизированного проектирования и SCADA широко применяются блочно-модульные методы, позволяющие объединять разнообразные компоненты в единую систему.

Рассмотрим протекание химической реакции в ячейке постоянного объема V с идеальным перемешиванием веществ внутри нее. На вход этой ячейки поступают вещества, вступающие в реакцию, на выходе получаем вещества, образовавшиеся в результате реакции, и непрореагировавшие остатки. Моделирование подобных процессов позволяет анализировать технологические аппараты в металлургии и химии [8-11].

Материальный баланс такой ячейки в статическом режиме описывается уравнением потоков:

$$\sum_{i=1}^n M_i F_i = \sum_{j=1}^m M_j F_j \quad (1)$$

где: M – молекулярные массы соответствующих веществ; F – потоки соответствующих веществ в молях за единицу времени; в левой части уравнения – потоки веществ, поступающих в реактор, в правой части – потоки веществ, уходящих из реактора.

Рассмотрим потоки для ячейки смешения в которой протекает химическая реакция:



Потоки веществ, поступающих в реактор, выражены уравнениями:

$$\begin{cases} F_{A_0} = F_A + F_r \\ F_{B_0} = F_B + F_r \\ F_S = F_r \end{cases}, \quad (3)$$

где: F_{A_0}, F_{B_0} – входящие в ячейку потоки веществ A и B ; F_A, F_B, F_S – выходящие из ячейки потоки; F_r – поток вещества, превращаемый в результате химической реакции в ячейке.

Так как реакция протекает в жидкой фазе без изменения объема, потоки веществ из уравнений (3) выражаются через концентрации веществ и объемную скорость:

$$\begin{cases} v C_{A_0} = v C_A + r_C V \\ v C_{B_0} = v C_B + r_C V \\ v C_S = r_C V \end{cases}, \quad (4)$$

где: C_U – соответствующие концентрации веществ ($U=A, B, C, \dots$), моль/м³; v – объемная скорость потока, м³/с; r_C – скорость реакции на один моль образующегося вещества в единице, $\frac{\text{моль}}{\text{с} \cdot \text{м}^3}$. В свою очередь, скорость реакции в растворе по закону действующих масс выражается через концентрации веществ, вступающих в реакцию, следующим уравнением:

$$r_C = K_C C_A C_B, \quad (5)$$

где: K_C – константа скорости химической реакции.

Если известны параметры веществ, поступающих в ячейку, то определить параметры реакционной смеси можно через степень превращения. Для данного случая существует аналитическое решение:

$$vC_{A_0} = vC_{A_0}(1 - X_A) + K_C C_{A_0}(1 - X_A)(C_{B_0} - C_{A_0}X_A)V \quad (6)$$

где: X_A – степень превращения вещества

A:

$$X_A = \frac{C_{A_0} - C_A}{C_{A_0}} \quad (7)$$

Из полученного уравнения можно найти выражение степени превращения в виде уравнения второго порядка:

$$C_{A_0}X_A^2 - \left(\frac{v}{K_C V} + C_{A_0} + C_{B_0}\right)X_A + C_{B_0} = 0 \quad (8)$$

Далее по известным формулам для решения квадратного уравнения находим значения степени превращения в области от 0 до 1:

$$X_A = \frac{\left(\frac{v}{K_C V} + C_{A_0} + C_{B_0}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{v}{K_C V} + C_{A_0} + C_{B_0}\right)^2 - 4C_{A_0}C_{B_0}}}{2C_{A_0}} \quad (9)$$

Решения этого уравнения для различных значений скорости подачи раствора и констант скорости приведены на рис. 1.

Более сложным является процесс взаимодействия газов по бимолекулярной реакции (2) в реакционной ячейке идеального смешения.

Если реакция протекает между газами с образованием газообразного продукта, то соотношения материального баланса (3) выражаются с учетом уравнения Менделеева-Клапейрона для идеальных газов:

$$\frac{P_{A_0}v_0}{R_a T_0} - \frac{P_{A}v}{R_a T} - r_P V = 0 \quad (10)$$

$$\frac{P_{B_0}v_0}{R_a T_0} - \frac{P_{B}v}{R_a T} - r_P V = 0 \quad (11)$$

$$\frac{P_{S+R}v}{R_a T} - 2r_P V = 0 \quad (12)$$

где: K_P – константа скорости реакции; P_{A_0}, P_{B_0} – парциальные давления веществ на входе в реактор; P_A, P_B, P_{R+S} – давления веществ внутри ячейки и на выходе из нее; v_0 – объемная скорость поступления веществ в ячейку; v – объемные скорости удаления веществ из ячейки; T_0, T – температуры реагентов на входе и внутри реактора; R_a – универсальная газовая постоянная.

В свою очередь, скорость реакции в газовой среде по закону действующих масс выражается через давления газообразных веществ, участвующих в реакции:

$$r_P = K_P P_A P_B \quad (13)$$

где: K_P – константа скорости реакции.

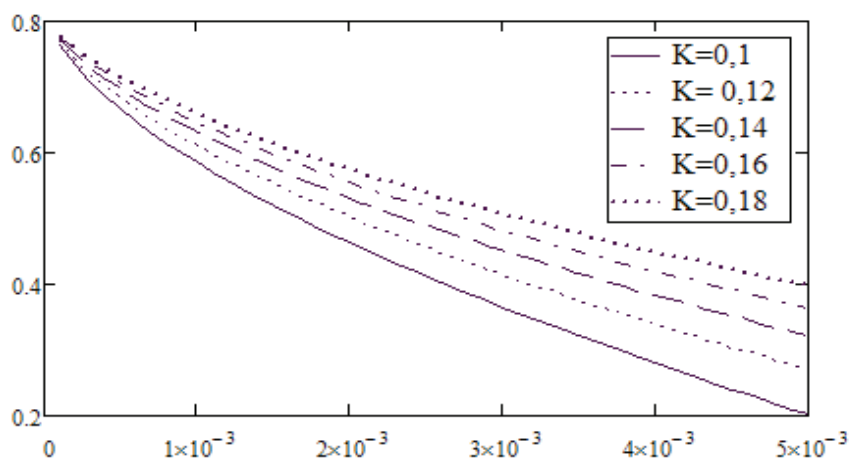


Рис. 1. Графики зависимости степени превращения X_A от скорости подачи раствора v , рассчитанные по уравнению (8), при различных значениях константы скорости реакции, $V=1$; $C_{A_0} = 0,1$; $C_{B_0} = 0,08$

Константа скорости реакции для уравнений, выраженных через давления с учетом зависимости от температуры, выражается уравнением Аррениуса:

$$K_p = k_0 e^{-\frac{E_a}{R_a T}} \quad (14)$$

где: k_0 – предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации.

Если известны параметры поступающих газов и потоков на входе, а также температуры реагентов снаружи и внутри ячейки, то можно вычислить парциальные давления и потоки веществ внутри ячейки и на выходе из нее в уравнениях (10)–(41). Для решения этой системы уравнений необходимо добавить сумму парциальных давлений на входе и выходе из ячейки и дополнительный поток инертного газа N , который не участвует в химических реакциях и только разбавляет реакционную среду. Сумма парциальных давлений газов на входе ячейки равна давлению потока на входе:

$$P_{A_0} + P_{B_0} + P_{N_0} = P_{\Sigma_0} \quad (15)$$

Сумма парциальных давлений газов внутри и на выходе из ячейки равна давлению выходного потока и внутри ячейки:

$$P_A + P_B + P_{R+S} + P_N = P_{\Sigma} \quad (16)$$

Уравнение баланса для инертного газа:

$$\frac{P_{N_0} v_0}{R_a T_0} = \frac{P_N v}{R_a T} \quad (17)$$

Аналитическое решение системы уравнений (9)–(14) возможно с применением численных методов [12] [13]. Для получения решения данную систему следует упростить до двух уравнений (9) и (10) с двумя неизвестными переменными P_A и P_B . Остальные неизвестные легко выражаются из стехиометрических соотношений и уравнений материального баланса, приведенных выше. На рисунке 2 представлена блочно-модульная схема, моделирующая механизм химического взаимодействия в газах

с расчетом основных показателей при заданных параметрах в Simulink [14]. В таблице 1 приведены основные параметры этой модели.

На блочно-модульной схеме, представленной на рисунке 2, вычисляются показатели химического взаимодействия в газах по бимолекулярной реакции (2). Решение основывается на приведении к нулю уравнений материального баланса (10) и (11), записанных в блоках Mt_Blns_A и Mt_Blns_B, с помощью итерационного поиска давлений P_A и P_B , выполняемого блоками Algebraic Constraint. На рисунке 3 показаны линии изменения степени превращения вещества А в заданных условиях, которые приведены на схеме и в таблице 1.

Входные потоки веществ F_{A_0} , F_{B_0} и F_{N_0} рассчитывают в блоках Mn_Kp_A_0, Mn_Kp_B_0 и Mn_Kp_N_0 по уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$F_{U_0} = \frac{P_{U_0} v_0}{R_a T_0} \quad (18)$$

где: F_{U_0} – входной поток вещества U ; $U=A, B, N$ – соответствующее вещество.

Выходные потоки веществ F_A и F_B рассчитывают в блоках Mn_Kp_A и Mn_Kp_B аналогично входным потокам по уравнению:

$$F_U = \frac{P_U v}{R_a T} \quad (19)$$

Скорость реакции по уравнению (13) рассчитывается в блоке Reaction_Rate, на входы которого поступают значения давлений A и B , а также константа скорости реакции, рассчитываемая по уравнению (14).

Скорость потока на выходе определяется также по уравнению Менделеева-Клапейрона в другой конфигурации:

$$v = \frac{F_{\Sigma} R_a T}{P_{\Sigma}}, \quad (20)$$

где: F_{Σ} – суммарный поток веществ на выходе, который вычисляется по уравнению:

$$F_{\Sigma} = F_A + F_B + F_N + F_{R+S}. \quad (21)$$

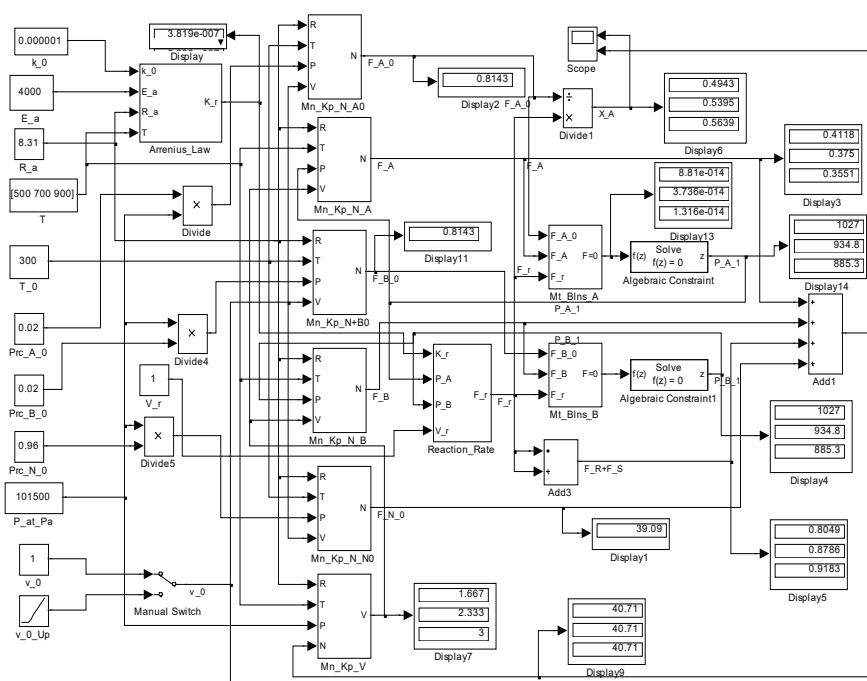


Рис. 2. Блочнo-модульная схема в Simulink, моделирующая механизм химического взаимодействия веществ в газовой фазе

Таблица 1. Основные параметры модели

№ пп	Наименование модуля/ блока, уравнение	Обозначение в тексте	Обозначение на схеме	Значение	Единицы измерения
1	Парциальное давление А и В на входе	$P_{A_0}^*, P_{B_0}^*$	Prc_A_0, Prc_B_0	0,02	Доли единицы
2	Давление на входе и выходе	$P_0 = P$	P_at_Pa	101500	Па
3	Температура на входе	T_0	T_0	300	°К
4	Температура внутри реактора	T	T	[500–800]*	°К
5	Объем реактора	V	V_r	1	м ³
6	Скорость подачи газа	v	v_0	[0,5-1,5]*	м ³ /с
7	Скорость реакции	$r_P, (13)$	Reaction_Rate	[...]*	моль/(с·м ³)
8	Константа скорости реакции	(14)	Arrenius_Law	[3,819e-5]*	$\frac{\text{моль} \cdot \text{м}^3}{\text{Па}^2 \cdot \text{с}}$
9	Материальный баланс А	(10)	Mt_Blns_A	0	моль/с
10	Материальный баланс В	(11)	Mt_Blns_B	0	моль/с
11	Итерационный блок		Algebraic Constraint		
12	Расчет потоков веществ	$F_{A_0}, F_{B_0}, F_A, F_B, F_N$	Mn_Kp_A0, Mn_Kp_A, Mn_Kp_B0, Mn_Kp_B, Mn_Kp_NO	[0,1–40]	моль/с
13	Расчет объемной скорости потока газа на выходе	v	Mn_Kp_V	[1–4]	м ³ /с

* В квадратных скобках указаны величины, изменяющие свои значения.

В левой части схемы расположены блоки констант (Const), задающие начальные условия и другие параметры расчета. В блоках Display и Scope отображаются результаты расчета в численном и графическом виде. Схема позволяет задать линейное изменение входной скорости потока газа в блоке V_0_Up, которое можно включить в блоке Manual Switch. Для отображения влияния температуры на моделируемый процесс задан массив из трех выходных температур процесса в блоке T. Результаты расчета передаются блоком Scope в рабочую среду для последующей обработки.

1. Представлена математическая модель химических взаимодействий, позволяющая

определить движущую силу и направление протекания реакций.

2. Разработана блочно-модульная схема, моделирующая механизм химического взаимодействия в газах с расчетом основных показателей при заданных параметрах в Simulink.

3. Выполнено решение модели взаимодействия веществ в газах и жидкостях аналитическими и численными методами.

4. Результаты работы схемы позволяют определить параметры процесса химического взаимодействия в жидкой и газовой среде и могут быть использованы при исследовании и проектировании аппаратов химической технологии и металлургии.

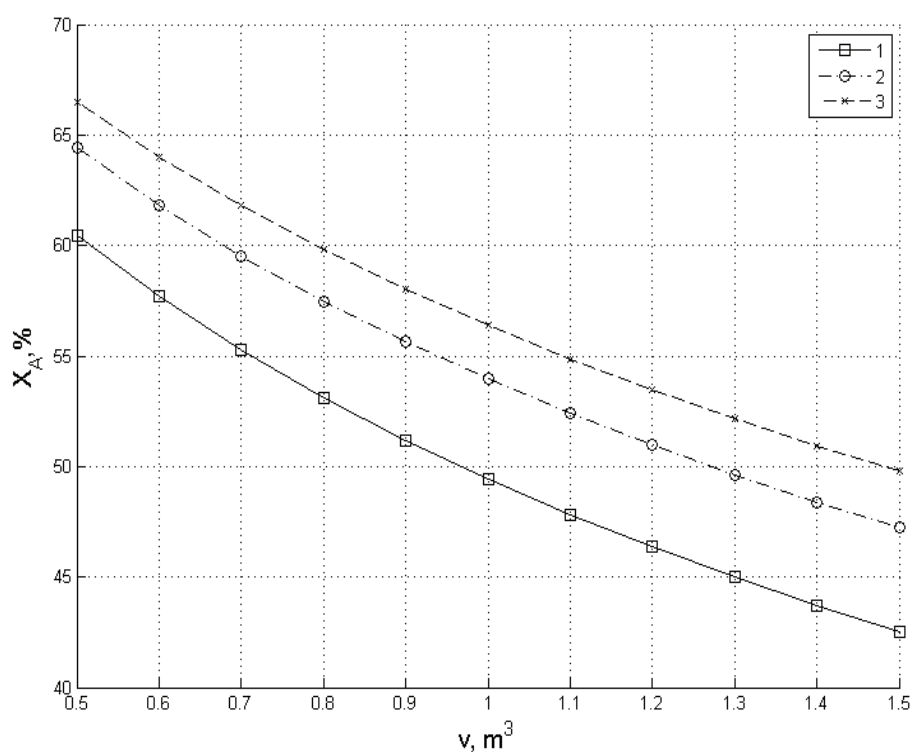


Рис. 3. Изменение степени превращения

ЛИТЕРАТУРА

1. Батунер Л.М., Позин М.Е. Математические методы в химической технике. Ленинград: Химия, 1971. С. 824.
2. Зайцев В.Я., Маргулис Е.В. Metallurgy свинца и цинка. Москва: Metallurgy, 1985. С. 263.
3. Вольдман Г.М., Зеликман А.Н. Теория гидрометаллургических процессов. 4 ред. Москва: «Интермет Инжиниринг», 2003. С. 464.
4. Дудников Е.Г. Построение математических моделей химико-технологических объектов / Е.Г. Дудников, В.С. Балакирев, В.Н. Кривоусов, А.М. Цирлин. Ленинград: Химия, 1970. С. 312.
5. Бигеев В.А., Черняев А.А., Пантелеев А.В. Исследование двухстадийного способа переработки пылей и шламов с помощью математических моделей // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2014. №3. С. 48-51.
6. Брыков Б.А., Лопатин А.Г., Вент Д.П. Моделирование процессов тепловыделения при синтезе полимеров методом радикальной полимеризации // Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. XXXII. №11. С. 9-12.
7. Гартман Т.Н., Клушин Д.В. Моделирование химико-технологических процессов. Принципы применения пакетов компьютерной математики: учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань, 2020. 404 с.
8. Зароченцев В.М. Динамика реакции в ячейке с идеальным смешением в растворе / В.М. Зароченцев, Т.В. Кондратенко, А.К. Макоева // Инженерный вестник Дона. 2018. №2 (49). С. 66.
9. Зароченцев В.М. Применение метода блочного моделирования каскада реакторов выщелачивания в среде Matlab // Известия вузов. Цветная металлургия. 2006. №4. С. 61-66.
10. Трусов Б.Г. Моделирование кинетики химических превращений: термодинамический подход // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2005. №3. С. 26-38.
11. Серета С.Н. Особенности моделирования химических реакторов в Matlab. Методы и устройства передачи и обработки информации. 2021. №23. С. 89-94.
12. Куприяшкин А.Г., Петухова Л.И. Математические модели металлургических процессов в ANYLOGIC // Научный вестник Арктики. Технические науки. 2019. №5. С. 6-12.
13. Саблин А.В. Моделирование процессов седиментации полидисперсных смесей при помощи пакета прикладных программ MATLAB // Наука и производство Урала. 2018. №14. С. 63-67.
14. Черных И.В. SIMULINK – среда создания инженерных приложений // Москва: «Диалог-МИФИ», 2004. 491 с.

BLOCK-MODULAR MODELING OF THERMODYNAMICS AND KINETICS OF PHYSICO-CHEMICAL TRANSFORMATIONS

© V.M. Zarochentsev, A.L. Rutkovskiy, I.I. Bolotaeva

North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

The paper presents the results of the analysis of processes occurring in metallurgical apparatuses described by thermodynamic and kinetic laws. The mathematical description of the processes listed below is presented in various literary sources, but often allows describing only individual chemical reactions, material balances or heat transfer processes. At the same time, in most cases, a disparate mathematical description cannot be combined into a single system that allows them to be considered in a comprehensive manner and perform calculations of metallurgical apparatuses.

The calculation of thermodynamic parameters of chemical interactions allows us to determine the driving force and direction of the reactions. Thermal and material flows are in the mode of free heat and mass

transfer between the components of the reaction mixture, the walls of the apparatus and the environment, forming a system of nonlinear equations that can be solved only by numerical methods. To create a software and mathematical description of processes in modern modeling systems, computer-aided design and SCADA, block-modular methods are widely used, allowing to combine various components into a single system, as a result of which block-modular modeling of the main mechanisms of chemical reactions of interaction in a homogeneous and heterogeneous medium is considered, taking into account the influence of mixing speed and temperature.

Keywords: block-modular modeling, thermodynamics, kinetics, physico-chemical transformations, reaction rate.

REFERENCES

1. Batuner, L.M. and Pozin, M.E. (1971). *Mathematical methods in chemical engineering*. "Chemistry", Leningrad, p. 824.
2. Zaitsev, V.Ya. and Margulis, E.V. (1985). *Lead and zinc metallurgy*. Metallurgy, Moscow, p. 263.
3. Voldman, G.M. and Zelikman, A.N. (2003). *Theory of hydrometallurgical processes*. 4th ed., "Internet Engineering", Moscow, p. 464.
4. Dudniko, E.G., Balakirev, V.S., Krivosunov, V.N. and Tsirlin, A.M. (1970). *Construction of mathematical models of chemical-technological objects*. Chemistry, Leningrad, p. 312.
5. Bigeev, V.A., Chernyaev, A.A. and Pantelev, A.V. (2014). 'Investigation of a two-stage method for processing dusts and sludges using mathematical models'. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. №3, Pp. 48-51.
6. Brykov, B.A., Lopatin, A.G. and Vent, D.P. (2018). 'Modeling of heat release processes in the synthesis of polymers by the method of radical polymerization'. *Advances in chemistry and chemical technology*. V. XXXII, №11, pp. 9-12.
7. Gartman, T.N. and Klushin, D.V. (2020). *Modeling of chemical-technological processes. Principles of application of computer mathematics packages*. Textbook. "Lan", St. Petersburg, 404 p.
8. Zaroquentsev, V.M. Kondratenko, T.V. and Makoeva, A.K. (2018). Reaction dynamics in a cell with ideal mixing in solution. *Engineering Bulletin of the Don*. №2 (49), pp. 66.
9. Zaroquentsev, V.M. (2006). 'Application of the method of block modeling of a cascade of leaching reactors in the Matlab environment'. *Izvestiya vuzov. Non-ferrous metallurgy*, №4, pp. 61-66.
10. Trusov, B.G. (2005). 'Modeling the kinetics of chemical transformations: a thermodynamic approach'. *Bulletin of MSTU named after N.E. Bauman. Ser. "Natural Sciences"*, №3, pp. 26-38.
11. Sereda, S.N. (2021). 'Features of modeling chemical reactors in Matlab'. *Methods and devices for transmitting and processing information*. №23, pp. 89-94.
12. Kupriyashkin, A.G. and Petukhova, L.I. (2019). 'Mathematical models of metallurgical processes in ANYLOGIC'. *Scientific Bulletin of the Arctic. Technical sciences*. №5, pp. 6-12.
13. Sablin, A.V. (2018). 'Modeling of sedimentation processes of polydisperse mixtures using the MATLAB application package'. *Science and production of the Urals*. №14, pp. 63-67.
14. Chernykh, I.V. (2004). *SIMULINK is an environment for creating engineering applications*. "Dialogue-MEPH". Moscow, 491 p.

ВЛИЯНИЕ НЕРАСТВОРИМЫХ ПРИМЕСЕЙ И ВИБРАЦИИ НА КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В РАСПЛАВАХ МЕТАЛЛОВ

© Н.С. Уздиева, А.С. Нурадинов, С.С-С. Ахтаев, М.Р. Исаева

ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова. Грозный, Россия

В данной работе авторами представлены результаты исследования влияния введения в модельный расплав нерастворимых примесей и воздействия поля упругих волн на процесс его кристаллизации, а соответственно на качество и механические свойства литого металла. Из-за непрозрачности расплавов реальных металлов для визуализации изучаемых процессов в работе использован метод физического моделирования на прозрачных органических средах.

По результатам моделирования оценена значимость индивидуальных свойств вводимых твердых частиц на дисперсность первичной кристаллической структуры и, как следствие, на уровень механических свойств литого металла. Показано, что при подборе нерастворимых добавок для эффективного воздействия на формирование первичной кристаллической структуры необходимо учитывать их каталитическую активность.

Ключевые слова. Камфен, переохлажденный расплав, зародышеобразование, кристаллизация, изоморфность примеси, первичная кристаллическая структура, вибрация, литые заготовки.

Формат цитирования: Уздиева Н.С., Нурадинов А.С., Ахтаев С.С-С., Исаева М.Р. Влияние нерастворимых примесей и вибрации на кристаллизационные процессы в расплавах металлов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том XIX. №2. 2023. С.57-65. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.30.35.007

Введение. Две стадии процесса кристаллизации – зарождение центров кристаллизации и скорость линейного роста этих центров оказывают существенное влияние на первичную структуру литых заготовок, а следовательно, – на качество и механические свойства металла. Известно, что в химически чистых металлах зарождение центров кристаллизации происходит самопроизвольно при их охлаждении, т.е. имеет место гомогенный механизм зародышеобразования. Для таких металлов задача описания процесса кристаллизации сводится к установлению характера зависимости параметров кристаллизации (скорости зарождения центров кристаллизации и их линейного роста) от температурных режимов охлаждения затвердевающих расплавов [13, 15].

Но на практике во всех реальных металлических сплавах зарождение центров кристаллизации, как правило, происходит по механизму гетерогенного зародышеобразования, т.е. образуются на твердых механических частичках, которые всегда в большом количестве

присутствуют в реальных металлах или специально вводятся в виде модификаторов I рода. При этом образование зародышей происходит при незначительном переохлаждении затвердевающего расплава в интервале температур кристаллизации разливаемого металла. А увеличение степени переохлаждения затвердевающего расплава для подобных металлических сплавов играет роль дополнительного стимулирующего процесс зародышеобразования фактора и, как следствие, повышает дисперсность первичной кристаллической структуры и уровень механических характеристик литого металла [1, 7, 14].

Исходя из классических представлений, гетерогенное формирование зародыша кристалла происходит на активных центрах твердых примесей, где в результате флуктуаций молекул переохлажденного расплава на поверхности подложки образуется кристаллическая решетка новой фазы [2, 3, 11]. В металлургии и литейном производстве значительную роль в кристаллизации металлических расплавов,

наряду с механическими примесями, играют также собственные оксиды и нитриды металлов [4, 8, 12].

Влияние на процесс гетерогенного зародышеобразования в реальных металлических сплавах оказывают множество факторов, в том числе теплофизические и гидродинамические условия их разлива. Наиболее очевидную положительную роль в этом процессе играют присутствующие в затвердевающем расплаве нерастворимые твердые частички-подложки [2, 3, 11]. Но современная теория кристаллизации расплавов металлов не дает однозначных рекомендаций по управлению процессом гетерогенного зародышеобразования для получения оптимальной первичной кристаллической структуры, а зачастую они противоречат друг другу [15-18]. В связи с чем, решение задач по управлению процессами кристаллизации реальных металлических сплавов осуществляется эмпирически, а результат зависит от опыта и компетенций технологов. Следовательно, сохраняется актуальность создания современных методик для определения влияния температуры охлаждения (переохлаждения) металлических расплавов на скорости зарождения центров кристаллизации и их линейного роста.

Основная часть. Несмотря на многочисленные теоретические и экспериментальные исследования по установлению закономерностей изменения параметров кристаллизации металлических сплавов в зависимости от теплофизических условий их разлива (температуры перегрева, скорости охлаждения, степени переохлаждения), можно констатировать об отсутствии общепринятых методов определения таких зависимостей для реальных металлов. Связано это не только со значительными скоростями кристаллизации металлов (до 5 м/с), но и невозможностью визуального наблюдения за процессом зародышеобразования в их расплавах. «По этой причине для изучения процессов зародышеобразования в металлах применяют метод физического моделирования, при котором роль металлических сплавов выполняют низкотемпературные (до 100°C) прозрачные органические и неорганические среды» [10, 13].

Для описания кинетики фазовых переходов первого рода в данной работе успешно использован метод физического моделирования исследуемых процессов с применением прозрачной органической среды камфен. Изучение скорости зарождения центров кристаллизации, их линейного роста и формирования первичной кристаллической структуры опытного слитка проведено в условиях воздействия на затвердевающий модельный расплав поля сил упругих волн с добавлением нерастворимых примесей, в качестве которых применялись порошки хлорида натрия и сахара. При одинаковых термодинамических условиях процесса кристаллизации количество добавок в экспериментах варьировалось от нуля до 4% по массе. По изменению линейных размеров кристаллов во времени определялась скорость роста кристаллов, а длительность затвердевания слитка камфена – по температурной кривой. Прозрачность расплава камфена позволяла визуально фиксировать изменения в структуре слитка.

Анализ экспериментальных результатов кристаллизации расплава камфена с добавлением нерастворимых примесей хлорида натрия и сахара свидетельствует о несущественном влиянии добавок на процесс зарождения частиц твердой фазы критического размера и их последующий рост. Это обусловлено широкой границей относительной устойчивости, т.е. значительным интервалом перехода из пересыщенного состояния в стабильное. Даже в условиях увеличения концентрации твердых нерастворимых примесей от 2 до 4% скорость зародышеобразования оставалась практически неизменной, что свидетельствует о неизоморфности кристаллических решеток используемых примесей. Об этом свидетельствуют построенные по результатам экспериментов кривые изменения температуры модельного расплава при охлаждении в зависимости от содержания в нем частиц хлорида натрия (рис. 1). Нахождение абсолютных значений температур модельного расплава для всех вариантов содержания примесей при прочих равных условиях в пределах границы погрешности для контрольного эксперимента (без примесей) свидетельствует о том, что заметного роста

скорости зародышеобразования не происходит. В противном случае, за счет увеличения теплоты кристаллизации, все опытные кривые лежали бы выше контрольной температурной кривой, а не наоборот, как в нашем случае (рис. 1).

В процессе повторной перекристаллизации испытуемых образцов камфена, в составе которых находились введенные ранее частицы примеси хлорида натрия, отмечается незначительный рост скорости зародышеобразования при сохранении неизменными температурных режимов охлаждения, то есть было отмечено заметное повышение активности добавок. Существует гипотеза, согласно которой процесс активации заключается в формировании контактного слоя кристаллизующегося вещества, характер упаковки атомов которого определяется твердой поверхностью примеси [3]. Температура плавления данного слоя должна быть существенно выше значения температуры плавления собственных кристаллов исследуемого сплава. Следует отметить, что во всех вариантах проведенных экспериментов температура перегрева сохранялась постоянной, но, по всей видимости, она оказалась недостаточной для того, чтобы дезактивировать

приобретенную ранее активность добавок хлорида натрия.

Уменьшение интервала метастабильности расплава, соответственно рост скорости зарождения частиц твердой фазы критического размера (центров кристаллизации), обусловлено контактным действием «активированных» частичек примесей на затвердевающий расплав. Это является следствием снижения работы зародышеобразования на твердой поверхности примеси A по отношению к работе образования зародыша в объеме расплава [3]:

$$A_{\Pi} = \frac{A_0(2 - 2\cos \alpha - \sin^2 \alpha)}{4}, \quad (1)$$

где α – краевой угол смачивания, определяемый поверхностным натяжением между метастабильной фазой и поверхностью подложки.

Для оценки активности частичек нерастворимых добавок иногда используют такие косвенные критерии, как количественные значения линейной скорости кристаллизации и общего времени затвердевания расплава, которые могут быть определены эмпирически в ходе проведения экспериментов.

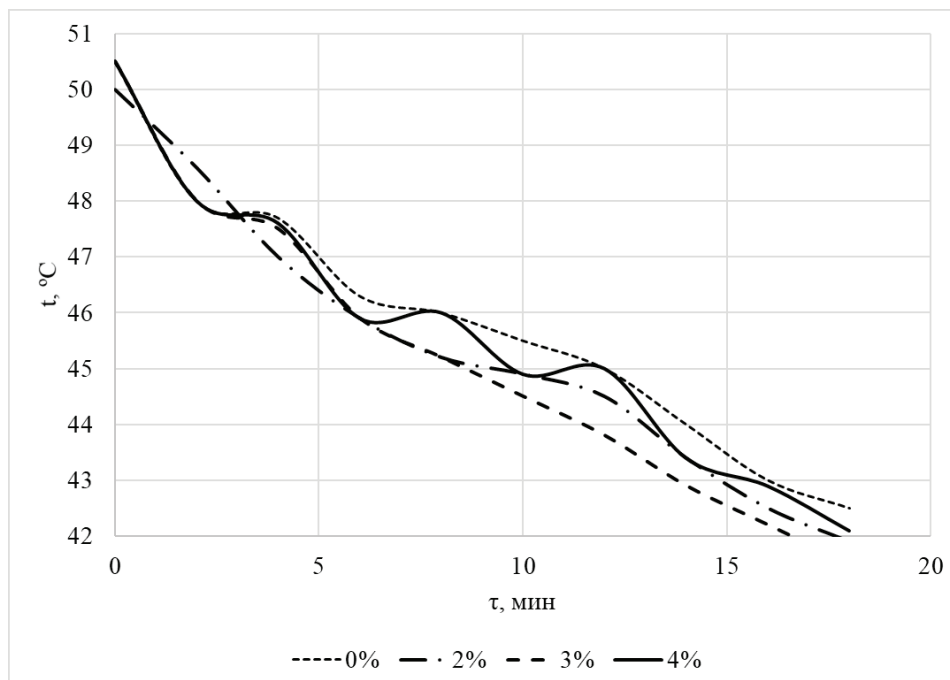


Рис. 1. Зависимость температурной кривой охлаждения расплава от концентрации введенных в модельное вещество примесей хлорида натрия

В существующей классической теории кристаллизации рост кристаллов объясняют, исходя из модели формирования двумерных зародышей. Для такой модели формирования зародышей линейную скорость кристаллизации определяют по следующей формуле [3]:

$$v_k = K_1 e^{-\frac{K_2}{T}} e^{-\frac{K_3}{T\Delta T}}, \quad (2)$$

где v_k – линейная скорость кристаллизации; e – основание натурального логарифма; T – абсолютная температура; ΔT – переохлаждение; K_1 , K_2 и K_3 – константы, зависящие от теплофизических характеристик расплава.

На рис. 2а и 2б представлено изменение скорости кристаллизации модельного расплава в зависимости от содержания вводимых в расплав твердых нерастворимых частичек.

На графиках отчетливо прослеживается тенденция снижения скорости кристаллизации расплава в присутствии примесей, что обусловлено, согласно формуле (1), меньшей работой зародышеобразования на нерастворимых добавках с наведенной активностью, чем аналогичной работой образования центров кристаллизации в объеме расплава без таких примесей. Очевидно, что в процессе кристал-

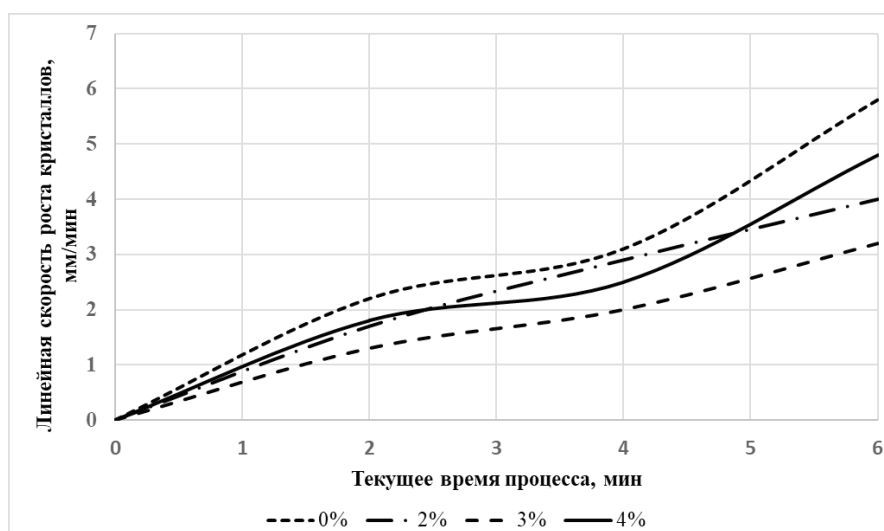


Рис. 2а. Изменение скорости кристаллизации модельного расплава в зависимости от содержания частиц хлорида натрия

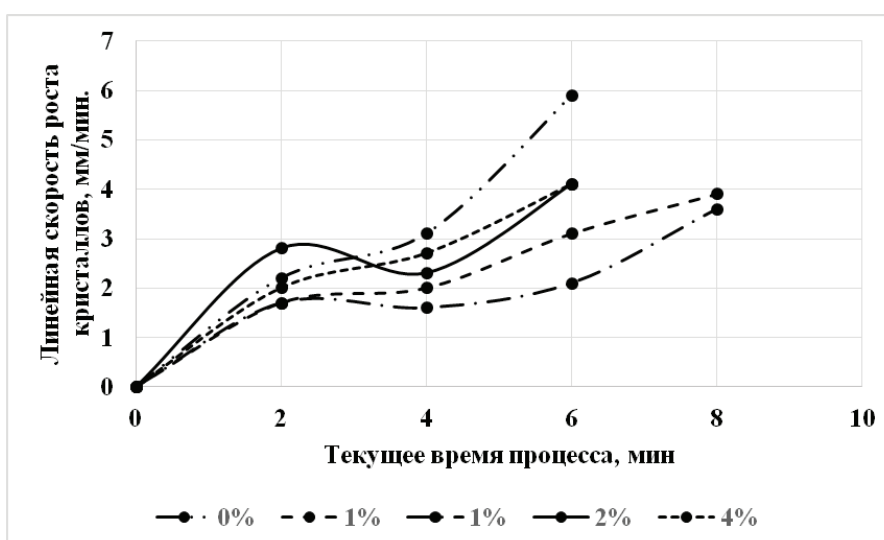


Рис. 2б. Изменение скорости кристаллизации модельного расплава в зависимости от содержания частиц сахара

лизации расплава в присутствии примесей наблюдается сдвиг границ метастабильного состояния в область меньших переохлаждений, то есть кристаллизация осуществляется при меньших переохлаждениях.

С уменьшением степени переохлаждения затвердевающего расплава, согласно зависимости (2), снижается и линейная скорость кристаллизации. Снижение степени переохлаждения опытного расплава при постоянных условиях теплоотвода от него является следствием увеличения скорости образования центров кристаллизации за счет модифицирующего эффекта твердых примесей и соответствующего изменения теплового баланса в рассматриваемой системе в целом. То есть увеличение теплоты кристаллизации, выделяющейся в расплаве вследствие роста скорости зародышеобразования при неизменных условиях охлаждения, повышает температуру расплава в целом, а значит – снижение степени его переохлаждения.

На рис. 3 представлена зависимость изменения общего времени затвердевания расплава от активности примесей, где отчетливо прослеживается снижение продолжительности затвердевания расплава в результате роста скорости зародышеобразования на частичках нерастворимых добавок, при этом отмечается снижение линейной скорости роста кристал-

лов. Такое сочетание этих параметров процесса кристаллизации (т.е. высокая скорость зародышеобразования при низкой скорости их линейного роста) является главным условием формирования дисперсной первичной кристаллической структуры литых заготовок, что подтвердилось при дальнейшем изучении структур модельных слитков.

Основным показателем активности любых примесей в затвердевающем расплаве (как растворимых, так и нерастворимых) является их влияние на кристаллическое строение слитков (т.е. дисперсность кристаллов и ширину структурных зон). Благодаря прозрачности модельного сплава (камфена), в ходе проведения опытов удалось зафиксировать существенное влияние «активированных» частичек примесей на размер зерна (особенно заметно проявляется в измельчении равноосных кристаллов) и параметры структурных зон в модельных слитках (табл. 1).

Мелкодисперсные частички и сахарного порошка, и хлорида натрия способствовали заметным преобразованиям кристаллической структуры модельных слитков. Но при этом частички сахарного порошка вследствие невысокой их «активируемости» (вероятно, из-за несоответствия типов кристаллических решеток сахара и камфена) были менее эффектив-

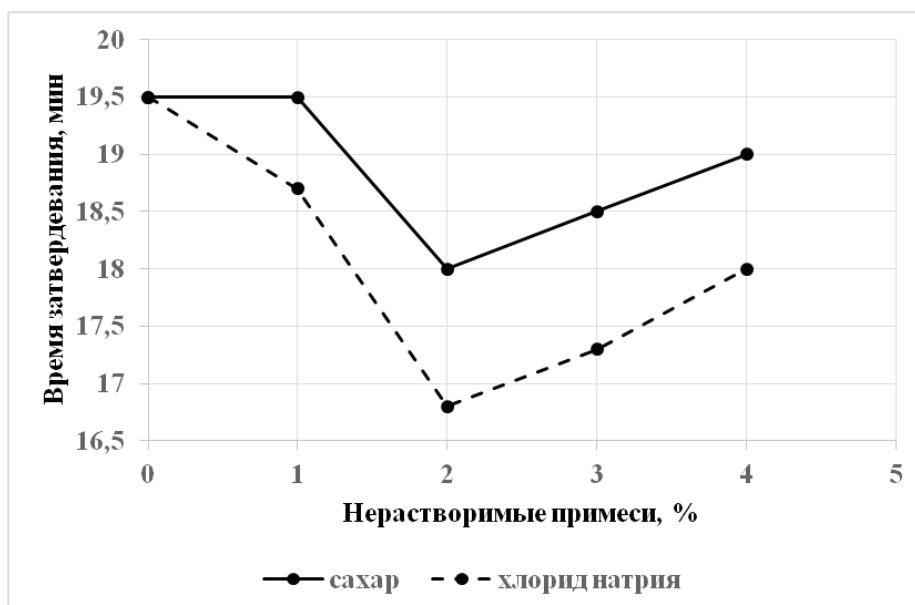


Рис. 3. Зависимость изменения общего времени затвердевания расплава от активности примесей сахара и хлорида натрия

Основные показатели затвердевания и структуры опытных слитков

Параметры	Ед. изм.	Камфен	Камфен+2% хлорида натрия	Камфен+2% сахара
Время затвердевания расплава	с	1170	1080	1110
Зоны транскристаллизации	мм	44	35	39
Зоны равноосных кристаллов	мм	41	59	50
Средний размер равноосных кристаллов	мм	10	3	5

ны, чем частички хлорида натрия (табл. 1). Относительная более высокая эффективность частичек хлорида натрия, наблюдаемая при их добавлении в затвердевающий модельный расплав, объясняется их лучшей «активируемостью» и, возможно, изоморфностью кристаллических решеток камфена и частичек соли.

В таблице 1 представлены общее время затвердевания и основные структурные характеристики модельных слитков из камфена. Полученные в результате экспериментальной части данные свидетельствуют о существенном влиянии «активированных» частичек использованных нерастворимых примесей на скорость зародышеобразования и, соответственно, на дисперсность структур слитков. Кроме этого, наблюдается также заметное их влияние на ширину структурных зон слитков. В зависимости от природы примесей и соответствующей им эффективности наведения искусственной активности дифференцируется и степень их воздействия на характеристики структур опытных слитков.

На сегодняшний день однозначно установлено, что воздействие вибрацией на затвердевающие металлические сплавы оказывает положительное влияние на формирование структуры и свойств литых заготовок из них [5, 6, 9]. Учитывая этот факт, все варианты экспериментов были повторены в условиях воздействия на изучаемые процессы сил упругих волн (вибрации) с целью сравнительной оценки эффективности используемых приемов для управления зародышеобразованием в опытном сплаве. При этом было установлено, что вибрационное воздействие на затвердевающий модельный сплав нивелирует эффект воздействия нерастворимых твердых добавок на формирование структур опытных слитков. Т.е. при воздействии сил

упругих волн на затвердевающие расплавы параметры кристаллических структур (дисперсность и размеры структурных зон) для всех вариантов опытных слитков оказались практически идентичными. Этот результат показывает, что модифицирующий эффект от воздействия вибрации на затвердевающий модельный сплав значительно выше, чем от использованных в работе нерастворимых примесей.

Заключение. Таким образом, результаты, полученные при исследовании влияния нерастворимых примесей и вибрации на кристаллизационные процессы в расплавах металлов, наглядно подтвердили современные представления о кинетике гетерогенного зародышеобразования в реальных металлических сплавах. Изучение влияния нерастворимых примесей сахара и хлорида натрия на формирование кристаллических структур опытных слитков показало, что способность к искусственной активации использованных нерастворимых примесей и изоморфность их кристаллического строения по отношению к камфену играют решающую роль в повышении зародышеобразования при кристаллизации этого модельного сплава. Из этого следует, что при выборе модификаторов первого рода для управления процессом формирования первичной кристаллической структуры литых заготовок необходимо исходить из необходимости обеспечения изоморфности кристаллического строения вводимых примесей с металлом и учитывать каталитическую активность добавок.

В работе показано, что при прочих равных условиях воздействие на кристаллизующийся модельный сплав поля упругих сил (вибрации) способствует улучшению структур и свойств металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Борисов В.Т.* Теория двухфазной зоны металлического слитка. М.: Metallurgy, 1987. 224 с.
2. *Васильковская Н.В.* Изучение гетерогенного зародышеобразования в воде и в легко переохлаждающихся жидкостях: автореферат кандидатской диссертации. Одесса, 1975. 21 с.
3. *Данилов В.И.* Структура и кристаллизация жидкости. К.: Издательство академии наук УССР, 1956. 568 с.
4. *Деев В.Б.* Влияние внешних воздействий на процессы кристаллизации сплавов и затвердевания отливок / *В.Б. Деев, А.И. Куценко, О.Г. Приходько, Е.С. Прусов, А.А. Соколов* // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2019. №42. С. 28-36.
5. *Ефимов В.А., Эльдарханов А.С.* Технологии современной металлургии. М.: Новые технологии, 2004. 784 с.
6. *Ефимов В.А., Эльдарханов А.С.* Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. М.: Metallurgy, 1995. 272 с.
7. *Казанцева Л.А., Калашиников М.П., Курзина И.А.* Влияние модифицирующих смесей на упрочнение Al-Si сплава марки АК7ч // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18. №1. С. 9-16.
8. *Найдек В.Л.* О воздействии нерастворимых добавок и вибрации на кристаллизацию переохлажденного расплава / *В.Л. Найдек, А.С. Эльдарханов, А.С. Нурадинов, Е.Д. Таранов* // Процессы литья. 2009. №6. С. 23-27.
9. *Нурадинов А.С., Нахаев М.Р.* Процессы кристаллизации и формирования структуры литых заготовок. Грозный: Изд-во ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет», 2020. 170 с.
10. *Нурадинов А.С.* Моделирование процесса валковой разливки-прокатки металлов / *А.С. Нурадинов, Н.С. Уздиева, С.С.-С. Ахтаев, М.Р. Исаева* // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2021. Т. 17. №3 (25). С. 25-32.
11. *Приходько О.Г., Деев В.Б., Прусов Е.С. и др.* Кристаллизация и формирование структуры алюминиевых сплавов и отливок после внешних физических воздействий в процессе литья // Металлургия: технологии, инновации, качество. Труды XXII Международной научно-практической конференции. Новокузнецк, 2021. С. 316-321.
12. *Прусов Е.С., Деев В.Б., Рахуба Е.М.* Влияние условий кристаллизации на формирование структуры композиционных сплавов // Литейное производство. 2019. №3. С. 6-8.
13. *Уздиева Н.С.* Влияние теплофизических условий затвердевания стальных слитков на их химическую неоднородность / *Н.С. Уздиева, С.С.-С. Ахтаев, А.А. Эльмурзаев, А.С. Нурадинов* // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2021. Т. 17. №1 (23). С. 26-37.
14. *Хамский Е.В.* Кристаллизация в химической промышленности. М.: Химия, 1979. 343 с.
15. *Эльдарханов А.С., Нурадинов А.С., Уздиева Н.С. и др.* Управление теплообменными процессами в валковом кристаллизаторе при бесслитковой прокатке металлов // Сталь. 2022. №4. С. 7-11.
16. *Nuradinov A.S., Nogovitsyn A.V., Nuradinov I.A. and others* Research of possibility of control of the formation of crystal structure of metal alloys // Science and innovation. 2020. №16 (4). P.67 - 73.
17. *Wei Yan, Zhanquan Hao, Weiqing Chen, Jing Li.* Mixing effect of slag compositions and additives on crystallization of mold fluxes for Ti-bearing steels // Journal of Materials Research and Technology Volume 10. 2021. P. 882-894.
18. *Zeng J., Koitzsch R., Pfeifer H., Friedrich B.* Numerical simulation of the twin-roll casting process of magnesium alloy strip // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209. P. 2321-2328.

EFFECT OF INSOLUBLE IMPURITIES AND VIBRATION ON CRYSTALLIZATION PROCESSES IN METAL MELTS

© N.S. Uzdieva, A.S. Nuradinov, S.S.S. Akhtaev, M.R. Isaeva

GSTOU named after. acad. M.D. Millionshchikov, Grozny, Russia

Abstract. In this paper, the authors present the results of a study of the effect of the introduction of insoluble impurities into the model melt and the effect of the elastic wave field on its crystallization process, and, accordingly, on the quality and mechanical properties of the cast metal. Due to the opacity of melts of real metals, the method of physical modeling on transparent organic media was used to visualize the processes under study.

Based on the simulation results, the significance of the individual properties of the introduced solid particles on the dispersion of the primary crystal structure and, as a consequence, on the level of mechanical properties of the cast metal is estimated. It is shown that when selecting insoluble additives for effective effect on the formation of the primary crystal structure, it is necessary to take into account their catalytic activity.

Keywords. Overcooled melt, nucleation, crystallization center, dispersed particles, primary crystallization, modifiers, vibration, elastic waves, kinetics, cast alloys, camphene, and isomorphic impurities.

REFERENCES

1. Borisov, V.T. (1987). *Theory of the two-phase zone of a metal ingot*, Metallurgy, Moscow, 224 p.
2. Vasilkovskaya, N.V. (1975). Study of heterogeneous nucleation in water and in easily supercooled liquids, abstract of the candidate's dissertation, Odessa, 21 p.
3. Danilov, V.I. (1956). Structure and crystallization of liquid. K.: Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 568 p.
4. Deev, V.B., Kutsenko, A.I., Prikhodko, O.G. and others (2019). 'Influence of external influences on the processes of crystallization of alloys and solidification of castings'. *Bulletin of the Mining and Metallurgical Section of the Russian Academy of Sciences, Department of Metallurgy*, №42, pp. 28-36.
5. Efimov, V.A., Eldarkhanov, A.S. (2004). *Technologies of modern metallurg.* New technologies, Moscow, 784 p.
6. Efimov, V.A., Eldarkhanov, A.S. (1995). *Physical methods of influence on the processes of solidification of alloys*, Metallurgy, Moscow, 272 p.
7. Kazantseva, L.A., Kalashnikov, M. P., Kurzina, I.A. (2021). 'Influence of modifying mixtures on hardening of Al-Si alloy of the AK7ch brand'. *Fundamental problems of modern materials science*, Vol. 18, №1, pp. 9-16.
8. Naidek, V.L., Eldarkhanov, A.S., Nuradinov, A.S., Taranov, E.D. (2009). 'On the effect of insoluble additives and vibration on the crystallization of supercooled melt', *Casting processes*, №6, pp. 23-27.
9. Nuradinov, A.S., Nakhaev, M.R. (2020). *Processes of crystallization and formation of the structure of cast blanks*. Publishing House of the Chechen State University, Grozny, 170 p.
10. Nuradinov, A.S., Uzdieva, N.S., Akhtaev, S.S.S., Isaeva, M.R. (2021). 'Modeling of the process of roll casting of metals', *Herald of GSTOU, Technical sciences*, Vol. 17, №3 (25), pp. 25-32.
11. Prikhodko, O.G., Deev V.B., Prusov E.S. and others (2021). 'Crystallization and structure formation of aluminum alloys and castings after external physical influences in the casting process'. *In the collection: Metallurgy: technologies, innovations, quality. Proceedings of the XXII International Scientific and Practical Conference*, Novokuznetsk, pp. 316-321.
12. Prusov, E.S., Deev, V.B., Rakhuba, E.M. (2019). 'Influence of crystallization conditions on the

- formation of the structure of composite alloys', *Foundry production*, №3, pp. 6-8.
13. Uzdieva, N.S., Akhtaev, S.S.-S., Elmurzaev, A.A., Nuradinov, A.S. (2021). 'Influence of thermophysical conditions of solidification of steel ingots on their chemical heterogeneity', *Herald of GSTOU, Technical sciences*, Vol. 17, №1 (23), pp. 26-37.
 14. Khamsky, E.V. (1979). *Crystallization in the chemical industry*, Chemistry, Moscow, 343 p.
 15. Eldarkhanov, A.S., Nuradinov, A.S., Uzdieva, N.S. and others (2022). 'Control of heat exchange processes in a roll mold during the ingotless rolling of metals', *Steel*, №4, pp. 7-11.
 16. Nuradinov, A.S., Nogovitsyn, A.V., Nuradinov, I.A. and others (2020). 'Research of possibility of control of the formation of crystal structure of metal alloys', *Science and innovation*, №16 (4), pp. 67-73.
 17. Wei Yan, Zhanquan Hao, Weiqing Chen, Jing Li (2021). 'Mixing effect of slag compositions and additives on crystallization of mold fluxes for Ti-bearing steels', *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 10, pp. 882-894.
 18. Zeng, J., Koitzsch, R., Pfeifer, H. and Friedrich, B. (2009). 'Numerical simulation of the twin-roll casting process of magnesium alloy strip', *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 2321-2328.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ ОКАТЫШЕЙ В БАРАБАННОМ ОКОМКОВАТЕЛЕ

© А.Л. Рутковский, Э.М. Бахтеев, Х.А. Бутов

СКГМИ (ГТУ), Владикавказ, Россия

Рассмотрена задача математического моделирования получения титановых окатышей в окомкователе барабанного типа. Целью данной работы является построение математической модели процесса окомкования в виде системы дифференциальных уравнений и обобщение полученных результатов экспериментально-статистическими методами. Представлена система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая взаимодействие твердых компонентов шихты с сульфитно-спиртовой бардой (ССБ), в результате чего при перемещении этих компонентов в окомкователе формируются окатыши. Построение математической модели, адекватной изучаемому процессу, дает возможность переходить к решению экстремальных задач и проверке полученных результатов экспериментальным путем. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что качество получаемых окатышей при прочих равных условиях (гранулометрический состав шихты, её температура, высота слоя шихты) зависит от соотношения расходов шихта – ССБ. При недостатке ССБ мелкие частицы шихты заполняют поры, что приводит к снижению газопроницаемости слоя шихты. При избытке ССБ жидкая фаза заполняет поры, что также приводит к снижению газопроницаемости. В обоих случаях снижается качество получаемых окатышей, вследствие неполного их обжига и увеличения оборота.

Ключевые слова: ильменит, барабанный окомкователь, сульфитно-спиртовая барда, процесс окомкования, математическая модель, оптимизация.

Формат цитирования: Рутковский А.Л., Бахтеев Э.М., Бутов Х.А. Моделирование процесса формирования титановых окатышей в барабанном окомкователе // Вестник ГГНТУ. Технические науки. №2. Том XIX, 2023. С.66-73. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.37.95.008

Введение. На сегодняшний день разработка и совершенствование математической модели процесса окомкования окатышей является актуальной научно-технической задачей. Однако универсального математического описания процесса до настоящего времени не существует ввиду сложности учета всех факторов, определяющих эффективность процесса, а также отсутствия математического описания некоторых физических явлений. Для достижения целевого качества окатышей необходимо учитывать факторы, влияющие на процесс окомкования и механизмы связывания на каждой стадии формирования окатышей. Как показывает практика окомкования, увлажнение шихты и роль связующего вещества имеют большое значение в технологическом процессе формирования окатышей. Содержание влаги во время окомкования можно контролировать, добавляя связующее с высокой водопоглощающей способностью, что позволяет расти сы-

рым окатышам с постоянной скоростью. Как правило, оптимальное содержание влаги для окомкования титаносодержащей руды находится в диапазоне 7-9 мас.% [1, 2]. Однако это также может зависеть от свойств, составляющих шихты.

Исследователями был рассмотрен широкий спектр связующих, альтернативных бенгону, включая органические связующие и неорганические добавки, которые могут служить для улучшения процесса окомкования и повышения прочностных характеристик окатышей [3-6]. Оптимальное связующее должно производить высококачественные окатыши с минимальными затратами, повышать влагоемкость и гидрофильность материала, а также содержать как можно меньше загрязняющих веществ. Распространенной связующей добавкой в цветной металлургии является сульфитно-целлюлозный щелок (лигносульфонаты). Лигносульфонаты добавляют в шихту,

чтобы уменьшить «липкость» поверхности окатышей и снизить скорость их роста [7]. К недостаткам использования ССБ относятся повышенный приход со связующими серы в виде SOx и, следовательно, почти трехкратное повышение ее содержания в окатышах, а также в два раза более низкую прочность обожженных окатышей [8].

В металлургической практике широко применяется математическое моделирование, в том числе и для процесса окомкования [9]. Построение математической модели, адекватной изучаемому процессу, дает возможность переходить к решению экстремальных задач и проверке полученных результатов экспериментальным путем.

Целью данной работы является построение математической модели процесса формирования титановых окатышей в виде системы дифференциальных уравнений и проверка полученных результатов экспериментально-статистическими методами.

Постановка задачи. Шихта состоит из ильменитового концентрата, органического связующего вещества и углеродистого восстановителя. В качестве ильменитового концентрата используются железотитановые концентраты с низким содержанием примесей [10]. В качестве связующего при изготовлении сырых окатышей используется органическое связующее, например, сульфитно-спиртовая барда (ССБ) в количестве 3-3,3% от массы шихты. В качестве углеродистого восстановителя используется антрацит с содержанием активно-

го углерода не менее 85% и серы не более 1%. Химический состав ильменитового концентрата приведен в таблице 1, из которой видно, что содержание TiO₂ составляет 50-55%, а содержание железа сравнительно ниже, но содержание FeO достигает 32-36%.

Шихта перед изготовлением окатышей измельчается до размера частиц по крупности 95-98% класса 74 мкм (0,074 мм), увлажняется перед окомкованием 4-5%.

Процесс получения титановых окатышей включает смешивание сырья, окомкование, сушку, подогрев, обжиг и охлаждение.

Получение сырых окатышей осуществляется в окомкователе барабанного типа (рис. 1). Окомкователь состоит из следующих основных узлов: цилиндрического барабана 1, внутри которого размещается шесть вставок 2, образующих усеченные конусы, причем больший диаметр конуса обращен в сторону разгрузки. Высота выступов 3 уменьшается к выходному концу, так что линия, проведенная через вершины выступов, образует с горизонтом угол 3-6°. Налипший на внутреннюю поверхность окомкователя материал удаляется неподвижными скребками 4. При такой конструкции окомкователя существенно увеличивается длительность пребывания в нем материала и, соответственно, удельная производительность на единицу объема [11]. Сырые окатыши диаметром 12-14 мм просеиваются для последующей сушки, предварительного нагрева и обжига.

Применение конусов способствует и сегрегации материала. Каждый конус действует как

Таблица 1

Химический состав компонентов шихты

Наименование	Массовая доля, %							
	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
Ильменитовый концентрат	50-55	32-36	10-15	до 0,1	до 0,7	до 0,8	до 0,5	до 0,1
	MnO	P ₂ O ₅	V ₂ O ₅					
	до 0,6	до 0,05	до 0,3					
ССБ	C	S	H	O	OCH ₃	OH		
	52	5,5	5	38	10	4		
Антрацит	C	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	S	H ₂ O		
	87-90	1,5-2	до 1,5	3-3,5	1,2	1,5		

тарельчатый окомкователь, что проявляется в характерном распределении материала (рис. 2) [12].

Установка конусной вставки в барабаны принципиально меняет возможности создания рациональных условий работы барабана, так как позволяет, изменяя отдельные параметры, одновременно оптимизировать другие. Так, увеличивая частоту вращения барабана или угол наклона, можно сохранить и даже увеличить время пребывания в нем шихты. В современных условиях для расчетов конструктивных размеров вставок, степени заполнения барабанов, массы и времени пребывания шихты в барабанах можно использовать адаптированные к промышленным условиям модельные исследования [13].

Процесс окомкования состоит из двух этапов: образования зародышей и накатывания шихты [14, 15].

Образование зародыша происходит сле-

дующим образом: капля ССБ попадает в слой шихты и благодаря силам поверхностного натяжения притягивает к себе частицы шихты. Образуются переувлажненные комки, обладающие высокой пластичностью.

Частицы шихты в зародыше окружены жидкостью и обладают относительной свободой перемещения, благодаря чему облегчается процесс уплотнения окатыша. Зародыши, скрепленные молекулярными силами притяжения, достаточно прочны и могут выдерживать без разрушения динамические нагрузки в окомкователе.

Вторая стадия формирования окатыша – его рост – осуществляется в результате многократных ударов о неподвижный слой материала при скатывании в окомкователе. Под действием динамических нагрузок зародыши уплотняются, то есть отдельные частицы в результате взаимного перемещения укладываются более плотно. При этом избыточная влага выдавли-

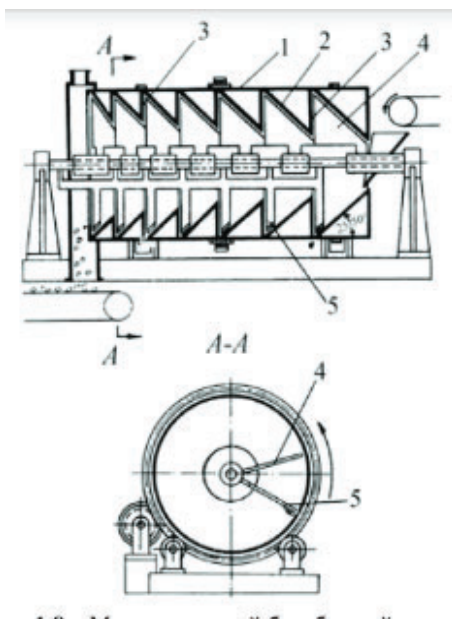


Рис. 1. Многоконусный барабанный окомкователь

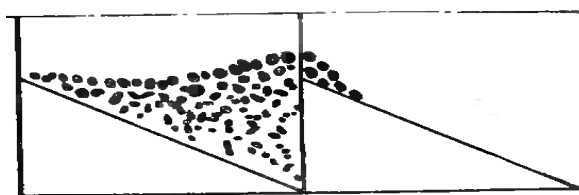


Рис. 2. Распределение материала в конусах барабанного окомкователя

вается на поверхность зародыша, благодаря чему становится возможным дальнейшее присоединение все новых частиц. При данном режиме работы окомкователя существует минимальная толщина пленок жидкости внутри окатыша, соответствующая величине динамических нагрузок. Как только этот предел будет достигнут, дальнейшее выделение жидкости на поверхность окатыша прекратится, и он перестанет расти [16].

Равномерно распределенная влага и связующее вещество в процессе подачи имеют решающее значение для улучшения характеристик окатышей, особенно для предотвращения образования нежелательных агломератов перед образованием гранул [17].

Сцепление частиц друг с другом в окатыше осуществляется за счет двух видов сил: Ван-дер-Ваальсовых (молекулярных) и капиллярных.

Капиллярные силы возникают на поверхности прослоек жидкости кольцевой формы, образующихся в точках контактов влажных твердых частиц комкуемого материала. При этом поверхность жидкости получается вогнутой, ее стремление выровнять свою поверхность создает отрицательное капиллярное давление, стягивающее частицы [18].

Задача математического описания объекта состоит в построении дифференциального оператора, переводящего начальную точку в конечную по заданной траектории. Так как окомкователь барабанного типа является объектом с распределенными параметрами, то модель представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных [18, 19].

С целью дальнейшего упрощения в работе приняты следующие допущения: скорость вращения, угол наклона и заполненность окомкователя; шихта однородна по гранулометрическому и химическому составу; не происходит слипания и разрушения окатышей; налипание их на стенки барабана; окатыши имеют правильную форму; уплотнение окатышей происходит равномерно; количество материала в каждой зоне одинаковое; крупность фракции и влажность поступающей шихты являются

величинами постоянными. В модели выделяются две фазы – фаза шихты и фаза окатышей; масса и размеры капли ССБ неизменны.

Моделирование процесса. Окомкование шихты характеризуется определенными параметрами и условиями процесса, которые могут быть выражены в виде функции F , имеющей вид:

$$F = f(m, n, m^{\text{ССБ}}, R, \mu, g) = 0$$

где m – масса окатышей, кг;

n – количество окатышей;

$m^{\text{ССБ}}$ – масса ССБ (органическое связующее вещество), кг;

R – приращение радиуса окатыша за счет ССБ и шихты;

μ – расход ССБ и шихты накатанный на окатыш;

g – масса переноса материала в зонах окомкователя.

При моделировании окомкования для каждой зоны барабанного окомкователя рассчитывают следующие характеристики шихты: распределение массового и количественного гранулометрических составов от времени; количество комков каждого диаметра и их общее количество; приращение радиуса частиц и гранул шихты за счет накатывания шихты; расход шихты и возвращаемого материала.

Математическая модель составлена для одной зоны окомкователя, уравнения для всех зон аналогичны.

Дифференциальные уравнения составляются относительно функций вида

$$m_i^*(t, r) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} m_i(t, c, r + \Delta r) / \Delta r \quad (1)$$

$m_i^*(t, r)$ – приведенная масса окатышей в i -ой зоне, кг/м;

$m_i(t, r, r + \Delta r)$ – масса окатышей радиуса r i -ой зоны, имеющих в момент времени t радиус от r до $r + \Delta r$, кг;

$$n_i^*(t, r) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} n_i(t, c, r + \Delta r) / \Delta r \quad (2)$$

$n_i^*(t, r)$ – приведенное количество окатышей

радиуса r в i -ой зоне, M^{-1} ;

$n_i(t, r, r + \Delta r)$ – количество окатышей i -ой зоны радиуса $[r, r + \Delta r]$ в момент времени t , шт.;

$$m_i^{*CCB}(t, r) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} m_i^{CCB}(t, r, r + \Delta r) / \Delta r \quad (3)$$

$m_i^{*CCB}(t, r)$ – приведенная масса ССБ в i -ой зоне, кг/м;

$m_i^{CCB}(t, r, r + \Delta r)$ – масса ССБ в окатышах i -ой зоны, имеющих в момент времени t радиус от r до $r + \Delta r$, кг;

Дифференциальное уравнение изменения приведенной массы окатышей выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial m_i^*(t, r)}{\partial t} + (R_1 + R_2) \frac{\partial m_i^*(t, r)}{\partial r} = g_{\text{ввк}} \left(\frac{m_{i-1}^*(t, r)}{M_{i-1}^{\text{общ}}} - \frac{m_i^*(t, r)}{M_i^{\text{общ}}} \right) + (\mu_1^{CCB} - \mu^{\text{ш}}) \cdot n_i^*(t, r) \quad (4)$$

Для $i = 1$ и $r > R_{10}$ $m_{i-1}^*(t, r) = 0$, если $r \leq R_{10}$, то $m_{i-1}^*(t, r) = m_0^*(t, r)$, где R_{10} – максимальный размер окатышей, возвращаемых для повторного окомкования, м; $g_{\text{ввк}}$ – масса переноса материала из одной зоны в другую, кг/с; $M_i^{\text{общ}}$ – масса материала в i -ой зоне, кг; μ_1^{CCB} – расход ССБ на один окатыш радиуса r , кг/с; $\mu^{\text{ш}}$ – масса шихты, накатанной на окатыш радиуса r , кг/с; R_1 – приращение радиуса окатыша за счет расхода ССБ, м; R_2 – приращение радиуса окатыша за счет накатанной шихты, м.

Уравнение изменения приведенного количества окатышей:

$$\frac{\partial n_i^*(t, r)}{\partial t} + (R_1 + R_2) \frac{\partial n_i^*(t, r)}{\partial r} = g_{\text{ввк}} \left[\frac{n_{i-1}^*(t, r)}{M_{i-1}^{\text{общ}}} - \frac{n_i^*(t, r)}{M_i^{\text{общ}}} \right] \quad (5)$$

При $i = 1$ и $r < R_{10}$ $n_{i-1}^*(t, r) = 0$, если $r \leq R_{10}$, то $n_{i-1}^*(t, r) = n_0^*(t, r)$.

Уравнение изменения приведенной массы ССБ в окатышах:

$$\frac{\partial m_i^{\text{ULb}}(t, r)}{\partial t} + (R_1 + R_2) \frac{\partial m_i^{\text{ULb}}(t, r)}{\partial r} = \mu_i^{CCB} \cdot m_i(t, r) +$$

$$g_{\text{ввк}} \cdot m_k \left(\frac{n_{i-1}^*(t, r)}{M_{i-1}^{\text{общ}}} - \frac{n_i^*(t, r)}{M_i^{\text{общ}}} \right), \quad (6)$$

m_k – масса капли ССБ, кг.

Уравнение изменения массы шихты:

$$\frac{dm_i^{\text{ш}}(t)}{dt} = g_{\text{ввк}} \left(\frac{m_{i-1}^{\text{ш}}(t)}{M_{i-1}^{\text{общ}}} - \frac{m_i^{\text{ш}}(t)}{M_i^{\text{общ}}} \right) - \mu_0 \quad (7)$$

$m_i^{\text{ш}}(t)$ – масса шихты в i -ой зоне в момент времени t , кг;

$$\mu_0 = \int_{R_0}^{R_{\text{max}}} \mu^{\text{ш}} \cdot n_i^*(t, r) dr \quad (8)$$

где R_0 и R_{max} – соответственно минимальный и максимальный радиус окатышей, м.

Масса материала в зоне:

$$\mu_i^{CCB} = \frac{m_i^*(t, r)}{n_i^*(t, r) \cdot M_i^{\text{общ}}} \cdot g_i^{CCB} \quad (9)$$

Расход ССБ на один окатыш радиуса r :

$$\mu_i^{\text{общ}} = m_i^{\text{ш}}(t) + \int_{R_0}^{R_{\text{max}}} m_i^*(t, r) dr \quad (10)$$

g_i^{CCB} – расход ССБ, кг/с; $\mu_i^{CCB} = 0$ при $i = 4, 5, 6$.

Приращение радиуса окатыша за счет расхода ССБ:

$$R_1 = \sqrt[3]{\frac{3\mu_i^{CCB} \cdot t}{4\pi\rho_{CCB}} + r^3} - r \quad t = 1c \quad (11)$$

Приращение радиуса окатыша за счет накатывания шихты:

$$R_2 = \sqrt[3]{\frac{100}{\varepsilon} \left(\frac{3\mu_i^{CCB}}{4\pi\rho_{CCB}} + r^3 \right) + \left(\frac{100}{\varepsilon} - 1 \right) (r - R_y)} - r \quad (12)$$

при $t = 1c$

ρ_{CCB} – плотность ССБ, кг/м³; ε – пористость шихты; R_y – уменьшение радиуса окатыша за счет уплотнения, м.

Масса шихты, накатанной на один окатыш:

$$\mu^{\text{ш}} = \frac{400\pi\rho^{\text{ш}}}{3\varepsilon} \left[\frac{3\mu_i^{\text{ULb}} \cdot t}{4\pi\rho_{CCB}} + r^3 - (r - R_y)^3 \right], \quad (13)$$

при $t = 1c$

$\rho_{\text{ш}}$ – плотность шихты, кг/м³.

Масса переноса материала из зоны в зону:

$$g_{\text{вык}} = G_{\text{загр}} + G_{\text{возвр}} \quad (14)$$

$G_{\text{загр}}$ – расход шихты, кг/с; $G_{\text{возвр}}$ – расход возвращаемого материала, кг/с.

В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что барабанный окомкователь с конусными вставками принципиально меняет возможность создания рациональных условий работы барабана, так как позволяет, изменяя отдельные параметры, одновременно оптимизировать другие. А также конусы способствуют повышению качества окомкования, геометрические параметры окомкователя влияют на газопроницаемость слоя. Для предотвращения разрушения готовых окатышей выгрузка их производится через отверстие меньшего диаметра, следовательно, при этом нагрузки постепенно уменьшаются при движении ком-

куемого материала к выпускному отверстию, что повышает качество окатышей.

2. Выполнен анализ физико-химических показателей процесса формирования титановых окатышей при взаимодействии в шихту органического связующего вещества сульфитно-спиртовой барды. Установлена возможность получения титановых окатышей из ильменитовых концентратов, при взаимодействии твердых компонентов шихты с ССБ и перемещении этих компонентов в барабанном окомкователе формируются окатыши.

3. Получены уравнения, описывающие массу и количественные показатели окатышей, которые имеют определенную геометрическую характеристику i -ой зоны окомкователя в зависимости от момента времени. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что качество получаемых окатышей при прочих равных условиях (гранулометрический состав шихты, её температура, высота слоя шихты) зависит от соотношения расходов шихта – ССБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рутковский А.Л. Моделирование газодинамических параметров шихты в процессе получения титановых окатышей с целью оптимизации / А.Л. Рутковский, Э.М. Бахтеев, А.К. Макоева, Х.А. Бутов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Т. 18. №2 (28). 2022. С. 63-71.
2. Poveromo J. Future Trends in Ironmaking / Raw materials & Ironmaking Global Consulting // Prepared for McMaster Blast Furnace Ironmaking Course, Bethlehem, USA, 11-16 May 2014.
3. Umadevi T. Influence of raw material particle size on quality of pellets / T. Umadevi, M. G. S. Kumar, S. Kumar, C. S. G. Prasad and M. Ranjan // Ironmaking and Steelmaking. 2008. Vol. 35. №5. Pp. 327-337.
4. Zhu D. Pan J., Lu L. and Holmes R.J. Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability. Woodhead Publishing. 2015. Pp. 435-473.
5. Halt J., Kawatra S.K. A. Review of Organic Binders for Iron Ore Concentrate Agglomeration / J. A. Halt and // Minerals and Metallurgical Processing. 2014. Vol. 31. №2. Pp. 73-94.
6. Srivastava U., Kawatra S. K., Eisele T. C. Study of Organic and Inorganic Binders on Strength of Iron Oxide Pellets // Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science. 2013. Vol. 44. №4. Pp. 1000-1009.
7. Sivrikaya O., Arol A.I. Thermal Investigation of Some Potential Binders for Iron Ore Pelletizing // In 16th International Mineral Processing Symposium (IMPS 2018). 2018. Pp. 550-557.
8. Dingeman, D.L. Modified native starch bas binder for pelletizing mineral material / D.L. Dingeman, W.E. Skagerberg // Oriox Technologies, Inc. US Patent 5306327. 1994.
9. Haas L.A. Aldinger J.A., Zahl R.K. Effectiveness of organic binders for iron ore pelletization. Report of Investigations, United States, Bureau of Mines, №9230. 1989. 25 p.
10. Кривоносов В.А., Пурматов Д.С. Математическая модель процесса обжига окатышей по зонам обжиговой машины для оптимизации режима. // Вестник ВГТУ. 2010. №5. С. 128-132.
11. Павловец В.М. Развитие техники и технологии окомкования железорудного сырья в металлургии: монография. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 336 с.

12. *Majercak S.* Peletizacia jemnozemnych materialov / Stefan Majercak. Bratislava: «Alfa» vydavatelstvo technickej a economickej literatury. 1976. 232 p.
13. *Фролов Ю.А.* Научно-техническое обоснование модернизации агломерационной фабрики ОАО «ЧМК» с охлаждением спека на агломерационных машинах / Ю. А. Фролов, Л. И. Полоцкий, А. Г. Птичников и др. // Бюллетень Черметинформации. 2010. №1. С. 9-11.
14. *Павловец В.М.* Окатыши в технологии экстракции металлов из руд: учеб. пособие. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2014. 345 с.
15. *Коротич В.И.* Теоретические основы окомкования железорудных материалов. М.: Металлургия, 1966. 251 с.
16. *Moraes S., Lima J., Ribeiro T.R.* Iron Ore Pelletizing Process: An Overview, Iron Ores and Iron Oxide Materials. Chapter 3. London: IntechOpen, 2018. 280 p.
17. *Журавлев Ф.М.* Совершенствование технологии производства окатышей и нового железорудного сырья для современной доменной плавки: в 2 т. Т. 1: Теория, технология и оборудование подготовки шихт и их окомкования в производстве окатышей / Ф.М. Журавлев, В.П. Лялюк, Н.И. Ступник и др. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 332 с.
18. *Рутковский А.Л.* Оптимизации режима технологического процесса сушки титановых окатышей в агрегате туннельного типа / А.Л. Рутковский, З.Г. Салихов, М.А. Ковалева, Э.М. Бакхтеев // Цветные металлы. 2021. №5. С. 89-94.
19. *Komiyama K.M., Guo B.Y., Zoughbi H.* Numerical analysis of titanium compounds in blast furnace hearth during titania addition. // Steel Research International. 2014. №6. Pp. 592-603.

SIMULATION OF THE PROCESS OF FORMATION OF TITANIUM PELLETS IN A DRUM PELLETIZER

© A.L. Rutkovskiy, E.M. Bakhteev, Kh.A. Butov

*North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State University of Technology),
Vladikavkaz, Russia*

The problem of mathematical modeling of obtaining titanium pellets in a drum-type pelletizer is considered. The purpose of this work is to build a mathematical model of the pelletizing process in the form of a system of differential equations and to generalize the results obtained by experimental and statistical methods. A system of differential equations in partial derivatives is presented, which describes the interaction of the solid components of the charge with the sulphite-alcohol stillage (SAS), as a result of which pellets are formed when these components are moved in the pelletizer. The construction of a mathematical model adequate to the process under study makes it possible to move on to solving extremal problems and verifying the results obtained experimentally. The simulation results allow us to conclude that the quality of the obtained pellets, all other things being equal (the particle size distribution of the charge, its temperature, the height of the charge layer) depends on the ratio of charge costs – SAS. With a lack of SAS, fine particles of the charge fill the pores, which lead to a decrease in the gas permeability of the charge layer. With an excess of SAS, the liquid phase fills the pores, which also leads to a decrease in gas permeability. In both cases, the quality of the pellets obtained decreases due to their incomplete roasting and increased turnover.

Keywords: ilmenite, drum-type pelletizer, sulphite-alcohol stillage, pelletizing process, mathematical model, optimization.

REFERENCES

1. Rutkovskiy, A.L., Bakhteev, E.M., Makoeva, A.K. and Butov, H.A. (2022). 'Simulation of the gas-dynamic parameters of the charge in the process of obtaining titanium pellets for the purpose of optimization'. *Herald of GSTOU. Technical sciences*. Volume XVIII, №2 (28), pp. 63-71.
2. Poveromo, J. (2014). Future Trends in Ironmaking. Raw materials & Ironmaking Global Consult-

- ing. Prepared for McMaster Blast Furnace Ironmaking Course, Bethlehem, USA, 11-16 May 2014.
3. Umadevi, T., Kumar, M.G.S., Kumar, S., Prasad, C.S.G. and Ranjan, M. (2008). 'Influence of raw material particle size on quality of pellets'. *Ironmaking and Steelmaking*. Volume 35, №5, pp. 327-337.
 4. Zhu D., Pan, J., Lu L. and Holmes, R.J. (2015). *Iron ore palletisation*. Iron Ore. Pp. 435-473.
 5. Halt, J.A. and Kawatra, S.K. (2014). 'Review of Organic Binders for Iron Ore Concentrate Agglomeration'. *Minerals and Metallurgical Processing*. Vol. 31, №2, pp. 73-94.
 6. Srivastava, U., Kawatra, S. K. and Eisele, T.C. (2013). 'Study of Organic and Inorganic Binders on Strength of Iron Oxide Pellets'. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. Vol. 44, №4, pp. 1000-1009.
 7. Sivrikaya, O. and Arol, A.I. (2018). 'Thermal Investigation of Some Potential Binders for Iron Ore Pelletizing'. In *16th International Mineral Processing Symposium (IMPS 2018)*. Pp. 550-557.
 8. Dingeman, D.L. and Skagerberg, W.E. Oriox Technologies, Inc. (1994), *Modified native starch bas binder for pelletizing mineral material*, US, Patent 5306327.
 9. Haas, L.A., Aldinger, J.A. and Zahl, R.K. (1989). Effectiveness of organic binders for iron ore pelletization. Report of Investigations United States, Bureau of Mines, №9230. 25 p.
 10. Krivososov, V.A. (2010). 'Mathematical model of pellet roast in zones of roast machines for optimization the regime'. *Herald of VSTU*. №5. Pp. 128-132.
 11. Pavlovets, V.M. (2022). *Development of equipment and technology for pelletizing iron ore raw materials in metallurgy*. Infra-Engineering, Vologda, 336 p.
 12. Majercak, S. (1976) *Pelletization of fine-grained materials*. «Alfa» vydavatelstvo technickej a ekonomickej literatury, Bratislava. 232 p.
 13. Frolov, Yu.A., Polockij, L.I. and Ptichnikov, A.G. (2010). 'Scientific and technical substantiation of the modernization of the sinter plant of ChMK with sinter cooling on sinter machines'. *Bulletin of Chermetinformaton*. №1. Pp. 9-11.
 14. Pavlovets, V.M. (2014). *Pellets in the technology of extraction of metals from ores: textbook*. Novokuznetsk: Ed. center SibSIU. 345 p.
 15. Korotich, V.I. (1966). *Theoretical Foundations of Pelletization of Iron Ore Materials*. Metallurgy Publishing House, Moscow. 251 p.
 16. Moraes, S., Lima, T. and Ribeiro, JR. (2018). 'Iron Ore Pelletizing Process: An Overview, Iron Ores and Iron Oxide Materials'. Chapter 3. IntechOpen, London, 280 p.
 17. Zhuravlev, F.M., Lyalyuk, V.P. and Stupnik, N.I. (2020). 'Improving the technology for the production of pellets and new iron ore raw materials for modern blast-furnace smelting: in 2 volumes'. *V. 1: Theory, technology and equipment for the preparation of charges and their pelletization in the production of pellets*. Infra-Engineering, Moscow; Vologda. 332 p.
 18. Rutkovskiy, A.L., Salikhov, Z.G., Kovaleva, M.A. and Bakhteev, E.M. (2021). 'An optimized process of drying titanium pellets in a tunnel kiln'. *Tsvetnye Metally*. №5. Pp. 89-94.
 19. Komiyama, K.M., Guo, B.Y. and Zoughbi, H. (2014). 'Numerical analysis of titanium compounds in blast furnace hearth during titania addition'. *Steel Research International*. №6. Pp. 592-603.

КОНЦЕПЦИЯ РЕМОНТНО-РЕСТАВРАЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ И СОСТАВОВ

© Д.К-С. Батаев¹, С-А.Ю. Муртазаев^{1,2}, П.Д. Батаева¹, А.Д. Батаев²

¹ КНИИ им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозный, Россия

² ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

Объекты культурного наследия Юга России остаются малоизученными, и проведение инженерно-изыскательских, научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ является особо важным и необходимым условием для разработки современных технологий и материалов для ремонта, восстановления и реставрации памятников истории и культуры.

Разработана концепция оптимизации ремонтно-восстановительных и реставрационных работ на объектах культурного наследия и разработки ремонтно-реставрационных вяжущих и ремонтно-реставрационных составов на их основе. В работе использованы методы аналитических исследований и научных обобщений, экспертных оценок, моделирования процессов, теории вероятности, математической статистики и системного анализа.

Выполнена классификация неорганических вяжущих веществ, в которую впервые вошли органико-неорганические вяжущие и добавки в ремонтно-реставрационные вяжущие вещества и составы. Предложено производить ремонт, восстановление и реставрацию памятников истории и культуры с применением разработанных в КНИИ имени Х.И. Ибрагимова РАН современных технологий и материалов для ремонтно-реставрационных работ. Для оценки и корректировки научной проблемы, связанной с разработкой ремонтно-реставрационных вяжущих и ремонтно-реставрационных составов, выполнен обзор исторического опыта. Разработана концепция развития в Чеченской Республике и Российской Федерации нового научного направления «Высокопрочные композиционные материалы на основе известковых (гидравлических и гидратных), гипсовых (гипсовых и ангидритовых) и магнезиальных вяжущих веществ».

Ключевые слова: концепция, ремонтно-реставрационные вяжущие, ремонтно-реставрационные составы, объекты культурного наследия, памятники истории, памятники культуры, жилые сооружения, оборонительные сооружения, циклопические постройки, жилые башни, полубоевые башни, боевые башни, замковые комплексы, склепы, солнечные усыпальницы, святилища, храмы, мечети, известь гидравлическая, известь гидратная, гипс, ангидрит, доломит, магнезиальные вяжущие, карбонизация, декарбонизация, теплообмен.

Формат цитирования: Д.К-С. Батаев, С-А.Ю. Муртазаев, П.Д. Батаева, А.Д. Батаев. Концепция ремонтно-реставрационных вяжущих и составов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. №2. Том XIX. 2023. С.74-84. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.80.87.009

В Конституции Российской Федерации закреплены обязанности каждого по сохранению объектов культурного наследия и права народов и иных этнических общностей на сохранение и развитие своей культурно-национальной самобытности, защиту, восстановление и сохранение историко-культурной среды обитания и источников информации о зарождении и развитии культуры [6].

Российская Федерация богата объектами культурного наследия (памятниками истории и культуры). Значительное количество памят-

ников истории и культуры находятся на Юге России. На территории Кавказа сосредоточены более 10 тысяч разнообразных памятников истории, археологии и архитектуры. Это монументальные, жилые и оборонительные сооружения, циклопические постройки, жилые, полубоевые и боевые башни, замковые комплексы, погребальные склепы, солнечные усыпальницы, древние языческие святилища и христианские храмы [5].

В Северо-Кавказском федеральном округе (СКФО) на учете находится более 300 объек-

тов культурного наследия федерального значения и более 4000 объектов, обладающих признаками объектов культурного наследия. Однако имеется множество и неучтенных объектов культурного наследия [2].

Объекты культурного наследия Северного Кавказа имеют не только историко-культурное значение, но и являются важным фактором социально-экономического развития республик СКФО. Стратегия развития СКФО до 2025 года, утвержденная Правительством Российской Федерации, рассматривает туризм как одно из важнейших направлений развития северокавказского региона, позволяющих задействовать и эффективно использовать социально-культурный, производственный и рекреационный потенциал [7]. Только в Чечне и Ингушетии имеется большое количество замковых комплексов с сооружениями башенного типа, каждый из которых представляет собой уникальную ценность для развития туристической и рекреационной отрасли. Обеспечение сохранности памятников истории и культуры является важнейшей задачей государства.

В настоящее время в СКФО в рамках государственной программы Российской Федерации «Развитие культуры и туризма» и за счет привлечения средств инвесторов и бюджетов северокавказских республик выполняется большой объем ремонтно-реставрационных работ. Указом Президента Российской Федерации №745 от 30 декабря 2021 года «О проведении в Российской Федерации Года культурного наследия народов России» в целях популяризации народного искусства, сохранения культурных традиций, памятников истории и культуры, этнокультурного многообразия, культурной самобытности всех народов и этнических общностей Российской Федерации 2022 год был объявлен Годом культурного наследия народов России [8]. Однако принятые и принимаемые меры по сохранению памятников истории и культуры в СКФО являются недостаточными для обеспечения их подлинной сохранности. Предстоит большая работа по ремонту, восстановлению и реставрации объектов культурного наследия (ОКН) Юга России

с соответствующим полномасштабным научно-техническим сопровождением.

Одной из главных задач в направлении оптимизации ремонтно-восстановительных и реставрационных работ на объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) является поиск ремонтно-реставрационных вяжущих (РРВ) и разработка на их основе ремонтно-реставрационных составов (РРС).

Данной проблемой занимается Отдел материаловедения Комплексного научно-исследовательского института имени Х.И. Ибрагимова РАН, у которого имеется определенный задел по материалам и технологиям ремонта, восстановления и реставрации памятников истории и культуры [1, 3], позволивший разработать настоящую концепцию современных ремонтно-реставрационных вяжущих и составов.

В рамках решения обозначенной проблемы выполнен обзор опыта строительства, ремонта и восстановления башенных поселений и их фортификационных сооружений, который позволил обобщить традиционные и современные ремонтно-восстановительные и реставрационные технологии для формулирования концепции ремонтно-реставрационных вяжущих и составов. Сделан вывод о том, что объекты культурного наследия Юга России остаются малоизученными, и проведение научно-исследовательских, археологических работ, изучение памятников истории и культуры является особо важным и необходимым условием для разработки технологии ремонта, восстановления и реставрации объектов культурного наследия и определения образа жизни, бытового уклада, хозяйственной деятельности народов, населяющих Юг России, начиная со средневекового периода [2].

Рассмотрены основные составы и вяжущие вещества, используемые при ремонте и восстановлении объектов культурного наследия. В результате установлено, что существует множество разнообразных вяжущих веществ, однако при ремонте и восстановлении памятников археологии, истории и культуры применяется лишь часть из них. Такие вяжущие вещества относят к ремонтно-реставрационным. А они, в свою очередь, подразделяются на ми-

неральные вяжущие вещества, т.е. неорганические и органические вяжущие вещества. Неорганические вяжущие вещества в зависимости от их основных свойств подразделяются на три основные группы: воздушные, гидравлические и кислотостойкие. Выполнена классификация неорганических вяжущих веществ, в которую впервые вошли органо-неорганические вяжущие и добавки в ремонтно-реставрационные вяжущие вещества и составы (рисунок 1). Предложено производить ремонт, восстановление и реставрацию памятников истории и культуры с применением разработанных в КНИИ РАН ремонтно-реставрационных составов на основе белого цемента, гидратной и гидравлической известей, гипса, ангидритового вяжущего и доломитовой извести [12].

Для оценки и корректировки нового научного направления по разработке РРВ и РРС интересен исторический опыт [1-3, 5].

В самые древние времена, примерно 3000-5000 лет назад, человек начал использовать необожженную глину, которую применяют и в наши времена для обмазки стен, производства самана кустарным способом и для других целей. Однако необожженная глина не может удовлетворять требования высокой прочности, поэтому её использование ограничено для несущих конструкций. Необожженная глина обладает слабыми вяжущими свойствами и малой стойкостью во влажных средах, следовательно, не соответствует возросшим требованиям строительной техники и технологий. Но когда речь идет о реставрации памятников истории и культуры с восстановлением подлинных свойств и качеств объекта, применение необожженной глины становится необходимым. И исследование свойств необожженной глины для ремонтно-реставрационных нужд стало одним из направлений поисковых исследований КНИИ имени Х.И. Ибрагимова РАН.

Еще 2000-3000 лет назад до нашей эры человек нашел кустарные способы получения вяжущих веществ и композиций на их основе, в первую очередь гипса и извести путем обжига природных гипса, ангидрида, известняка,

магнезиальных пород и пр. Известно, что ещё 2500 лет назад до нашей эры гипс и известь применялись при возведении Египетских пирамид.

Исследования показывают, что со временем человек научился предавать известковым вяжущим гидравлические свойства с помощью добавления необожженной глины, обожженной глины (цемянки), измельченных горных вулканических пород, таких как туф, пепел, пемза и прочее. Наши исследования последних пяти лет являются подтверждением этому. Известковые вяжущие с гидравлическими свойствами человек издревле применял для возведения гидротехнических сооружений. Имеется свидетельство о применении гидравлических известковых вяжущих в I тысячелетии до нашей эры в Апеннинском полуострове, богатом залежами вулканических туфов и пеплов.

Известковые вяжущие вещества в Древней Руси применялись при возведении и Десятинной церкви в Киеве (990 г. н.э.) и Софийского собора в Киеве (XI в. н.э.). Софийский собор в Киеве построен с использованием извести, смешанной с цемянкой для повышения долговечности. В XI-XV вв. н.э. в России в практике строительства религиозных и культовых сооружений использовались жирная кальциевая и тощая магнезиальная извести. Дальнейшим толчком в развитии производства извести в России послужил «Каменный приказ», учреждённый в 1584 г. в Москве, который регламентировал заготовку строительного камня, выпуск кирпича и изготовление извести. В республиках Северного-Кавказа имеются ОКН, возведенные в III тысячелетии до нашей эры (крепость Нарын-Кала, г. Дербент) и в средние века нашей эры, при возведении которых применялись гидратные и гидравлические извести с добавками цемянки, золы и измельченных естественных пород.

Имеются также сведения о том, что в известковые растворы для специальных целей добавляли бычью кровь и яичный белок [5]. Однако наши эксперименты не подтвердили это, а бычью кровь, из гуманитарных соображений, мы исключили из экспериментов.

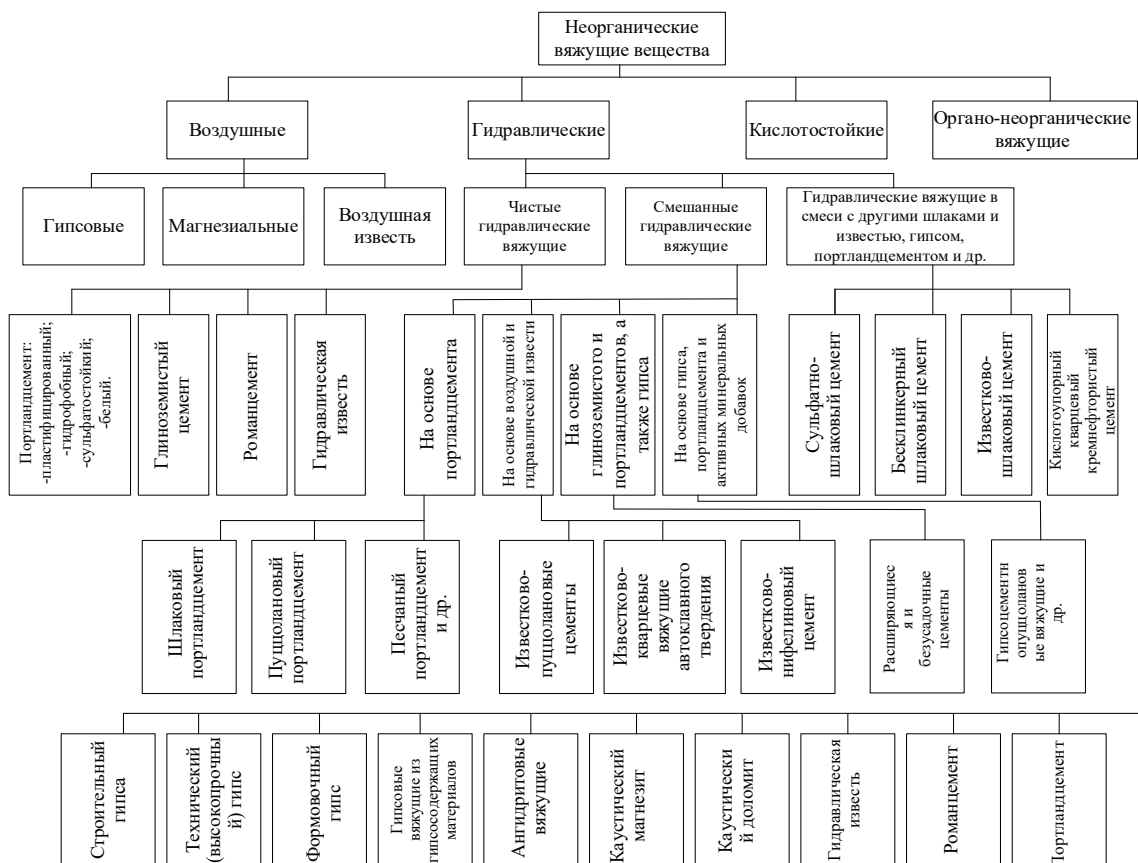


Рис. 1. Классификация неорганических вяжущих веществ

Поисковые исследования на основе анализа отечественного и зарубежного опыта [9, 10, 13-15] и выполненные нами лабораторные исследования позволили разработать концептуально «ромашку свойств и требований» ремонтно-реставрационных вяжущих и составов (рисунок 2), которая в ядре определяет свойства и требования к РРС: долговечность, адгезия, сходство свойств, оптимальная реология, экологичность, экономичность, эластичность, безусадочность, деформативность и водонепроницаемость. Из этой группы можно выделить четыре главных свойств и требований: это долговечность, адгезия и сходство свойств. Сходство свойств, в принципе, вбирает в себя оптимальную реологию, эластичность, безусадочность, деформативность и водонепроницаемость. А экологичность и экономичность можно отнести к оценке качества состава. Сформированные вокруг свойств и требований ремонтно-реставрационные составы можно разделить на три группы: на основе известковых (гидравлических и гидратных), гипсовых

(гипсовых и ангидритовых) и магнезиальных вяжущих веществ.

Даже по скромным расчетам количество РРС составляет 16, а если учитывать количество сочетаний из 16 составов по 2-3 компонентам вяжущего в каждом, получается внушительное число, определенное пока концептуально.

Необходимо отметить, что на основе известковых (гидравлических и гидратных), гипсовых (гипсовых и ангидритовых) и магнезиальных вяжущих веществ можно получать многокомпонентные известковые композиты (рисунок 3), в том числе и высокопрочные с регулируемыми и управляемыми свойствами [11].

В качестве преимуществ известковых вяжущих веществ (гидравлических и гидратных), гипсовых вяжущих веществ (гипсовых и ангидритовых), магнезиальных вяжущих веществ следует отметить, что их себестоимость в 2 и более раза ниже цементных вяжущих, из-за низких затрат при производстве. Это видно даже если сравнить температуры их обжига:

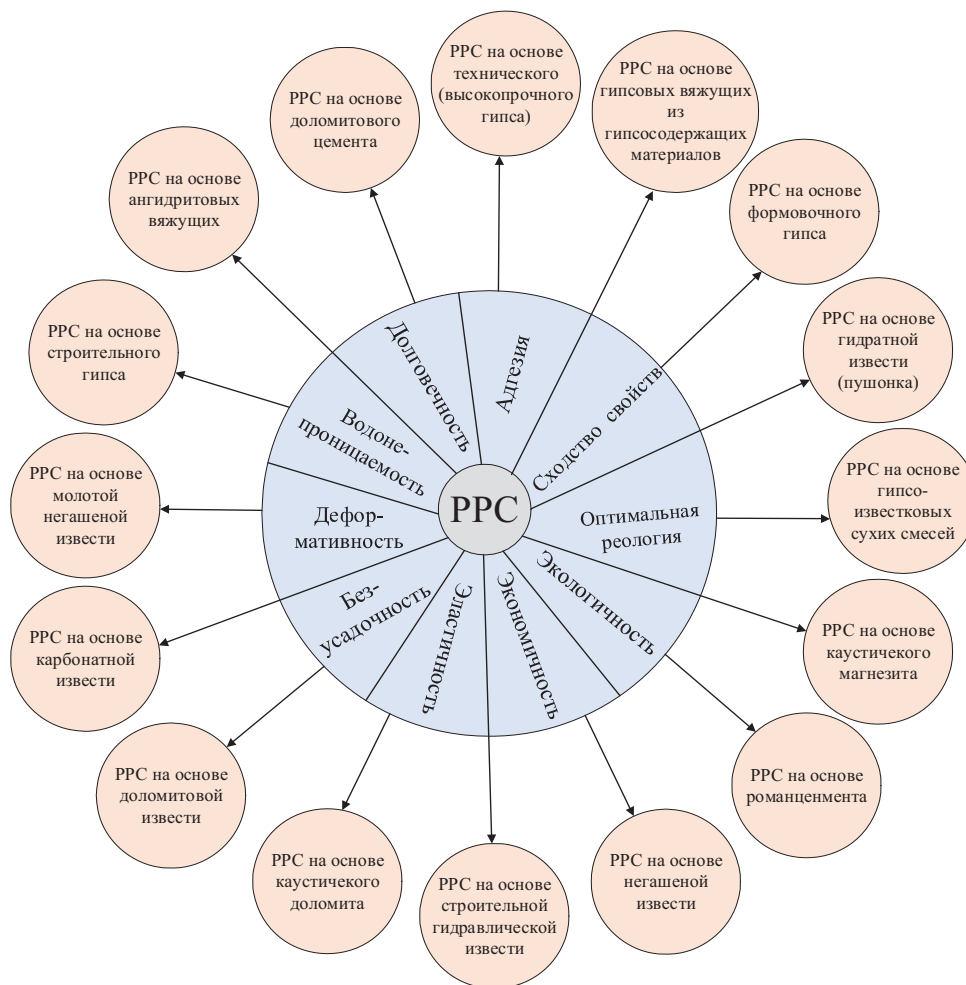


Рис. 2. Ремонтно-реставрационные вяжущие (РРВ) и составы (РРС)

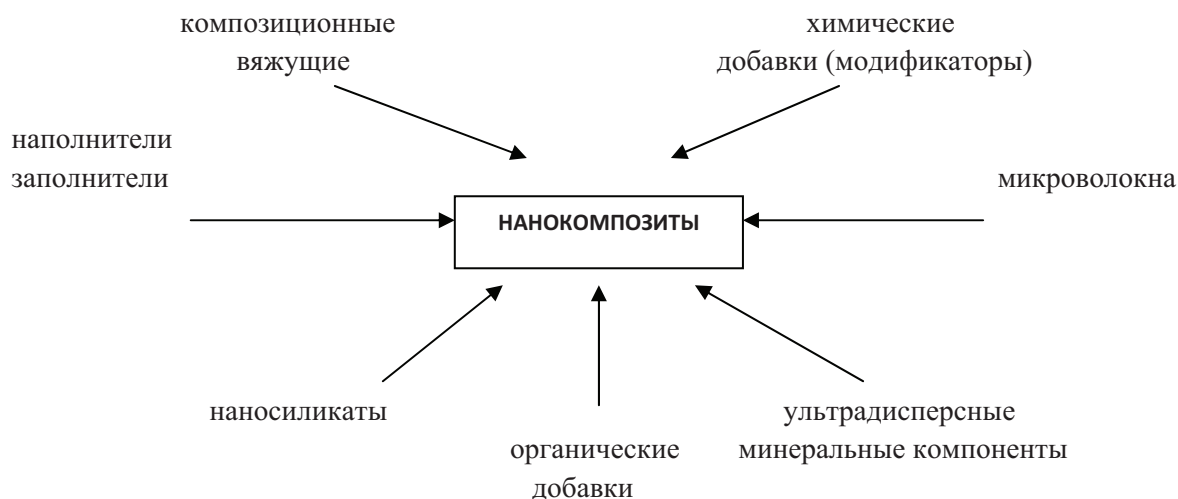
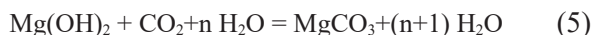


Рис. 3. Структура многокомпонентных известковых композитов

- цемент – 1450-2580 град,
- известь – 700-1100 град,
- гипс – 150-180 град.

Выбросы вредных веществ в атмосферу при производстве извести, гипса ниже. При оценке экологического вреда на окружающую среду при производстве комплексных вяжущих и композиционных материалов из известковых, гипсовых (гипсовых и ангидритовых) и магнезиальных пород необходимо учитывать международный протокол по углеродному балансу в природе. При производстве известковых и магнезиальных вяжущих выделяется углерод (1, 2, 3), а при гидратации и твердении их – углерод поглощается (4, 5), достигая со временем нулевой баланс. При производстве гипса углерод вовсе не выделяется, а выпаривается лишь $1,5H_2O$ (6).



Известны три способа твердения извести (гидратной, гидравлической, магнезиальной) (рисунок 4) и два вида ее карбонизации (рисунок 5) [2, 3].

Твердение известкового композита происходит в результате сращивания кристалликов, образующегося карбоната с частицами гидроксида кальция ($Ca(OH)_2$) и заполнителя. При карбонизации гидрата окиси кальция $Ca(OH)_2$ объем твердой фазы увеличивается.

При увеличении объема твердой фазы дополнительно уплотняется и упрочняется твердеющий известковый композит. В процессе карбонизации образуются, наряду с карбонатом кальция, разные соединения типа $CaCO_3 \cdot n Ca(OH)_2 \cdot m H_2O$.

При твердении известкового композита очень медленно испаряется вода и медленно протекает процесс карбонизации. Процесс карбонизации может занять несколько сотен лет. Объясняется это тем, что карбонизация захватывает преимущественно поверхностный слой при малой концентрации углекислого газа CO_2 (примерно 0,03%), а большая плотность пленки образующегося карбоната затрудняет дальнейшее проникание CO_2 вовнутрь известкового композита. В начальный период твердения композитов из гашеной извести на рост



Рис. 4 Типы твердения извести

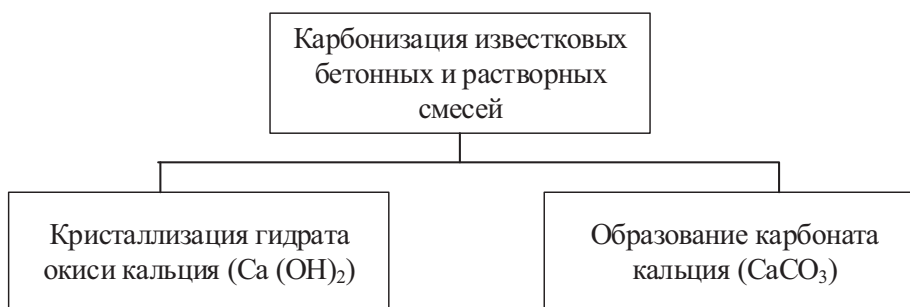


Рис. 5. Виды карбонизации известковых смесей

их прочности влияют процессы высыхания и перекристаллизации частиц $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Таким образом, в процессах декарбонизации и карбонизации известковых вяжущих веществ и материалов присутствует тепло-массообмен, так как обжиг известняка или доломита является основной технологической операцией, при которой происходит полное разложение CaCO_3 и $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ на CaO , MgO с выделением углекислого газа CO_2 . Тепло-массообмен присутствует также и при тепловой и тепловлажностной обработке известковых композиционных материалов и изделий.

Как было сказано выше, реакция диссоциации и декарбонизации CaCO_3 и $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ имеет вид (1, 2, 3) и является обратимой реакцией. При решении прикладной задачи – обжиг известняка, возникает потребность оценки развития явления декарбонизации: скорости реакции, фронта разложения, границы разложения $\text{CaO} - \text{CaCO}_3$, времени диссоциации и др.

К главному преимуществу можно отнести долговечность композитов на основе комплексных известковых, гипсовых и магнезиальных вяжущих, которая на порядок выше современных композиционных материалов – 1000 лет и более.

К недостаткам комплексных известковых, гипсовых и магнезиальных вяжущих веществ следует отнести ограничение этажности строительства при их использовании – до 10-15 этажей, что вполне приемлемо для регионов с высокой сейсмической активностью, и широкий разброс прочностных показателей – от 15 кг/см^2 до 350 кг/см^2 .

Комплексные известковые, гипсовые и магнезиальные вяжущие вещества можно про-

изводить промышленным (рисунок 6) и кустарным (рисунок 7-9) способами [2].

Производство известковых, гипсовых и магнезиальных вяжущих веществ целесообразно наладить на базе Чири-Юртовского цементного завода или ИСТ «Казбек». Возможны варианты создания заводских мощностей ближе к месторождениям природного гипса, ангидрита, известняка и доломита. Природные залежи их достаточны на территории горной Чеченской Республики для промышленной разработки в масштабах Российской Федерации [4].

При реализации проекта РРВ и РРС имеет место новое научное направление «Высокопрочные композиционные материалы на основе известковых (гидравлических и гидратных), гипсовых (гипсовых и ангидритовых) и магнезиальных вяжущих веществ», охватывающее научные специальности: «Технология и организация строительства», «Строительные материалы и изделия» и «Теоретическая теплофизика и теплотехника», по которым КНИИ имени Х.И. Ибрагимова РАН и ГГНТУ имени М.Д. Миллионщикова готовит кадры высшей квалификации в своих аспирантурах. Обозначенное научное направление может в будущем охватить подготовку 5 докторских и более 30 кандидатских диссертаций, что может повлечь за собой создание на базе Отдела материаловедения КНИИ имени Х.И. Ибрагимова РАН, или отдельно, всероссийского, по масштабу, научно-исследовательского института неорганических и органических вяжущих веществ и композиционных материалов. Наукоемкий сектор экономики в Чеченской Республике имеется в части промышленности строительных материалов, что является основой для развития фундаментальной и прикладной науки отрасли.

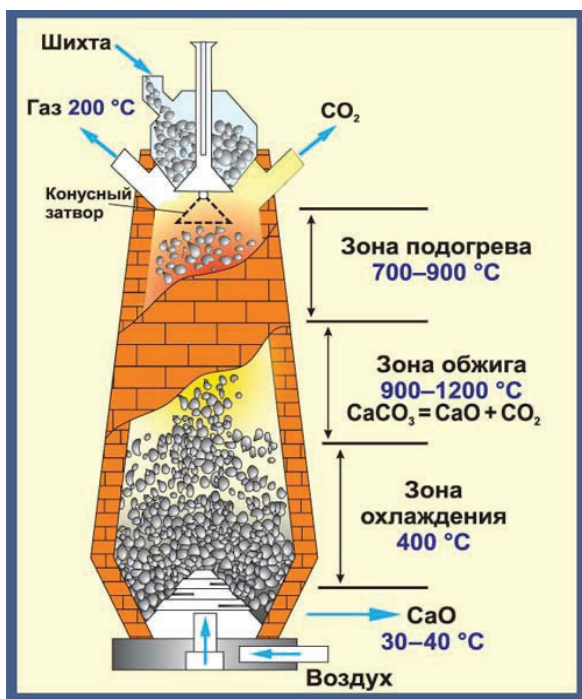


Рис. 6. Промышленная установка для обжига извести



Рис. 7. Старинная печь в Новосибирской области для обжига извести



Рис. 8. Старинная печь в Саратовской области для обжига извести



Рис. 9. Печь в с. Автуры Чеченской Республики для обжига извести

ЛИТЕРАТУРА

1. *Батаев Д.К.-С.* Органо-неорганические вяжущие для ремонта и реставрации памятников истории и культуры башенного типа / *Д.К.-С. Батаев, С.Г. Шеина, С.-А.Ю. Муртазаев, П.Д. Батаева* // Материалы конференции «Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика», приуроченной к 60-тилетию члена-корреспондента Академии наук ЧР, доктора технических наук, профессора С.-А.Ю. Муртазаева. Грозный: АЛЕФ, 2021. С. 129-135.
2. *Батаева П.Д.* Обзор составов и технологий для ремонта и реставрации объектов культурного наследия // Вестник Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук. 2021. №5. С. 49-53.
3. *Батаева П.Д.* Магнезиальное вяжущее для приготовления ремонтно-реставрационного состава // Вестник Комплексного научно-исследовательского института им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук. 2020. №4. С. 43-49.
4. *Виноградов Б.Н.* Сырьевая база промышленности вяжущих веществ СССР. М.: Недра, 1971. 324 с.
5. *Ильясов Л.Ч.* Тени вечности. Чеченцы: материальная культура, история, духовные ценности / Российская Академия наук, Ин-т этнологии и антропологии им. Н.Н. Миклухо-Маклая. Изд. 2-е, испр. и доп. М., 2021. С. 173-233.
6. Конституция Российской Федерации (принята всенародным голосованием 12.12.1993) (с учетом поправок, внесенных Законами РФ о поправках к Конституции РФ от 30.12.2008 №6-ФКЗ, от 30.12.2008 №7-ФКЗ, от 05.02.2014 №2-ФКЗ, от 01.07.2020 №11-ФКЗ) // Собрание законодательства РФ. 01.07.2020. №31. Ст. 4398.
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. №317 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие культуры»» // Собрание законодательства РФ. 25.04.2014.
8. Указ Президента Российской Федерации от 30 декабря 2021 года №745 «О проведении в Российской Федерации Года культурного наследия народов России».
9. *Шелихов Н.С., Рахимов Р.З.* Комплексное использование карбонатного сырья для производства строительных материалов // Строительные материалы. 2006. №9. С 40-42.
10. *Шелихов Н.С., Рахимов Р.З.* Гидравлическая известь и романцемент из минерального сырья Татарстана // Строительный вестник Татарстана. 2002. №2. С. 48-53.
11. *Bazhenov Yu.M.* Prospects for the Development of Nanostructured Polymer Composites in the Chechen Republic / *Yu.M. Bazhenov, D.K.-S. Bataev, Kh.N. Mazhiev, P.D. Bataeva* // International journal of environmental & science education. 2016.Vol. 11. №18. P. 12687-12697.
12. *Bataev D.K.-S.* Organic-inorganic composition for stone masonry walls of ancient tower and necropolis buildings in the North Caucasus / *D.K.-S. Bataev, S.-A.J. Murtazaev, Kh.N. Mazhiev, M.M. Maloroev, D.K.-S. Bataev, R.U. Goitemirov, M.A. Gaziev, P.D. Bataeva* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Volume 1103. International Scientific Conference Interstroyemeh (ISM 2020). Samara. P. 224-232.
13. *Stark J.* Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis // Cement and Concrete Research. 2011. №41.
14. *Tomaszewski A.* Politika ochrony dóbr kultury w polsce // Ochrona zabytków. 1995. № 3-4. Pp. 249-252.
15. *Weyer C.* Restaurierung und öffentlichkeit. beitrage zur berufsbilddiskussion // Symposium Düsseldorf-Benrath. 1993.

THE CONCEPT OF NEW REPAIR AND RESTORATION BINDERS AND COMPOSITIONS

©D.K-S. Bataev¹, S.-A.Y. Murtazaev^{1,2}, P.D. Bataeva¹, A.D. Bataev²

¹ Kh. Ibragimov Complex Institute of the RAS, Grozny, Russia

² GSTOU named after acad. M.D. Millionshikov, Grozny, Russia

The objects of the cultural heritage of the South of Russia remain poorly studied and the conduct of engineering and survey, research and development work is a particularly important and necessary condition for the development of modern technologies and materials for the repair, restoration and restoration of historical and cultural monuments.

Development of the concept of optimization of repair, restoration and restoration works at cultural heritage sites and development of repair and restoration binders and repair and restoration compositions based on them. The methods of analytical research and scientific generalizations, expert assessments, process modeling, probability theory, mathematical statistics and system analysis are used in the work.

The results of the work. The classification of inorganic binders was carried out, which for the first time included organo-inorganic binders and additives in repair and restoration binders and compositions. It is proposed to repair, restore and restore historical and cultural monuments using modern technologies and materials for repair and restoration work developed at the Kh.I. Ibragimov Research Institute of the Russian Academy of Sciences. To assess and correct the scientific problem associated with the development of repair and restoration binders and repair and restoration compositions, a review of historical experience was carried out. The concept of development in the Chechen Republic and the Russian Federation of a new scientific direction "High-strength composite materials based on lime (hydraulic and hydrate), gypsum (gypsum and anhydrite) and magnesia binders" has been developed.

Keywords: concept, repair and restoration binders, repair and restoration compositions, cultural heritage sites, historical monuments, cultural monuments, residential structures, defensive structures, cyclopean buildings, residential towers, semi-combat towers, combat towers, castle complexes, crypts, solar tombs, sanctuaries, temples, mosques, hydraulic lime, hydrate lime, gypsum, anhydrite, dolomite, magnesia binders, carbonation, decarbonization, heat and mass transfer.

REFERENCES

1. Bataev, D.K-S., Sheina, S.G., Murtazaev, S.-A.Yu. and Bataeva, P.D. (2021). 'Organo-inorganic binders for repair and restoration of historical and cultural monuments of the tower type' *Materials of the conference "Topical issues of modern science: theory, technology, methodology and practice", dedicated to the 60th anniversary of Corresponding member of the AS of the Chechen Republic, Doctor in Engineering, Professor S.A.Y. Murtazaev.* ALEPH, Grozny, pp. 129-135.
2. Bataeva, P.D. (2021). 'Overview of compositions and technologies for the repair and restoration of cultural heritage objects'. *Bulletin of the Complex Scientific Research Institute named after KH.I. Ibragimov of the RAS.* №5, pp. 49-53.
3. Bataeva, P.D. (2020). 'Magnesia binder for the preparation of repair and restoration composition' *Bulletin of the Complex Scientific Research Institute named after KH.I. Ibragimov of the RAS.* №4, pp. 43-49.
4. Vinogradov, B.N. (1971). *Raw material base of the industry of binders of the USSR.* Publishing house "Nedra", Moscow, 324 p.
5. Ilyasov, L.Ch. (2021) *Shadows of eternity. Chechens: Material Culture, History, spiritual Values.* N.N. Miklukho-Maklay Russian Academy of Sciences, Institute of Ethnology and Anthropology. Ed. 2nd, correct. and add., Moscow, pp. 173-233.
6. The Constitution of the Russian Federation (adopted by popular vote on 12.12.1993) (subject to amendments made by the Laws of the Russian Federation on Amendments to the Constitution of the Russian Federation from 30.12.2008 N 6-FKZ, from 30.12.2008 N 7-FKZ, from 05.02.2014

- No. 2-FKZ, dated 01.07.2020 No. 11-FKZ). Collection of Legislation of the Russian Federation, 01.07.2020, №31, Article 4398.
7. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 317 of April 15, 2014 “*On approval of the State program of the Russian Federation “Development of Culture”*”. Collection of Legislation of the Russian Federation. 04/25/2014.
 8. Decree of the President of the Russian Federation No. 745 dated December 30, 2021 “*On holding the Year of Cultural Heritage of the Peoples of Russia in the Russian Federation*”.
 9. Shelikhov, N.S. and Rakhimov R., Z. (2006) ‘Complex use of carbonate raw materials for the production of building materials’. *Building materials*. №9, pp.40-42.
 10. Shelikhov, N.S. and Rakhimov, R.Z. (2002). ‘Hydraulic lime and roman cement from mineral raw materials of Tatarstan’, *Construction Bulletin of Tatarstan*. №2, pp. 48-53.
 11. Bazhenov, Yu.M., Bataev, D.K-S., Mazhiev, Kh.N. Bataeva, P.D.(2016). ‘Prospects for the Development of Nanostructured Polymer Composites in the Chechen Republic’. *International journal of environmental & science education*. Vol. 11, №18, 12687-12697.
 12. Bataev, D.K-S., Murtazaev, S-A.J., Mazhiev, Kh.N., Maloroev, M.M., Bataev, G.K-S., Goitemirov, R.U., Gaziev, M.A. and Bataeva, P.D. (2020). ‘Organic-inorganic composition for stone masonry walls of ancient tower and necropolis buildings in the North Caucasus’. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1103, International Scientific Conference Interstroyneh (ISM 2020)*. Samara, pp. 224-232.
 13. Stark, J. (2011). ‘Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis’. *Cement and Concrete Research*. №41.
 14. Tomaszewski, A. (1995). Politika ochrony dóbr kultury w polsce *Ochrona zabytków*. №3-4, pp. 249-252.
 15. Weyer, C. (1993). ‘Restaurierung und öffentlichkeit. beitrage zur berufsbilddiskussion’. *Symposion Düsseldorf-Benrath*.

ВЫБОР ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© М.Н. Кокоев¹, В.Т. Федоров²

¹КБГУ им. Х.М. Бербекова, Нальчик, Россия

²Концерн «Наноиндустрия», Москва, Россия

Производство строительных материалов: строительной керамики, силикатного кирпича, ЖБИ и добыча минерального сырья для предприятий стройматериалов вносит большой углеродный след в окружающую среду. Этим наносится ущерб природе, сравнимый с металлургическими заводами. Продолжающийся рост цен на энергоносители повышает себестоимость строительных материалов. Первые работы в России по использованию геотермальных месторождений для производства энергоёмких строительных материалов появились в 1996 году. Рассматривается, каким критериям должно соответствовать геотермальное месторождение, пригодное для этого. Большинство геотермальных месторождений имеют температуру воды не выше 80-90°C при достаточной тепловой мощности месторождения. Предложен метод для получения температуры 200°C и выше от низкотемпературного теплоносителя, необходимой для производства многих стройматериалов. Преобразование осуществляется по схеме: паровая турбина на низкокипящем рабочем теле – аэродинамический преобразователь (нагреватель). Исключение электрического генератора и резистивного нагревателя повышает КПД и снижает стоимость оборудования для получения высоких температур.

Ключевые слова: производство строительных материалов, геотермальное месторождение, аэродинамический преобразователь (нагреватель).

Формат цитирования: Кокоев М.Н., Федоров В.Т. Выбор геотермальных месторождений для производства строительных материалов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. №2. Том XIX. 2023. С. 85- 93. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.48.25.010

Интерес к исследованиям возобновляемых источников энергии (ВИЭ) получил новый импульс после первого и самого большого энергетического кризиса, который возник в результате арабо-израильской войны в октябре 1973 года, так называемой войны Судного дня. Война длилась меньше месяца, но за последующий 1974 год цена на нефть поднялась с трёх до двенадцати долларов за баррель. При сравнении с современными ценами на нефть доллар за почти 50 лет обесценился на мировом рынке минимум в 7-8 раз.

Многие виды ВИЭ зависят от изменений внешних условий, от которых суточная и сезонная мощность подвержена большим колебаниям. В отличие, например, от ветряных и солнечных электростанций, геотермальные источники энергии способны работать стабильно и бесперебойно многие годы при должном техническом обслуживании их [1, 2]. После многих десятиле-

тий использования геотермальной энергии для отопления, в тепличном хозяйстве, выработки электроэнергии и даже для извлечения редких металлов, в основном лития, из геотермальных вод [3, 4], общественность всерьёз озаботилась проблемами экологии.

Раньше и особенно в последние годы стали обращать внимание, что геотермальная вода содержит много солей, а в некоторых присутствуют и растворённые и газообразные вредные примеси выше предельно допустимой концентрации. Такие как тяжёлые металлы: сероводород, метан, углекислый газ, аммиак, пары ртути, радий и радон. От использованных стоков геотермальных станций загрязняются подземные и поверхностные воды, корродируют трубы и оборудование. Более того, в некоторых горячих источниках постепенно снижается температура воды, засоряются отложениями трубы, что угрожает не окупить

вложенные средства в бурение скважин и освоение геотермальных месторождений.

Решая экологические проблемы, лидеры по использованию тепла Земли в разных странах развивают ГеоТЭС. Электростанции, работающие на геотермальных месторождениях, обычно снабжают теплом близлежащих потребителей. Поэтому их называют геотермальными тепловыми электростанциями – ГеоТЭС. Все последующие страны перечислены по убыванию суммарной мощности ГеоТЭС: США, Индонезия, Турция, Филиппины, Мексика, Новая Зеландия, Италия, Исландия и др.

Среди 28 стран (на 2018 г.), использующих подземное тепло Земли для выработки электроэнергии, Россия находится в середине списка со своими ГеоТЭС. Первую в СССР ГеоТЭС спроектировали и построили в 1966 году на Камчатке, в долине реки Паужетка. Сегодня в России работают четыре ГеоТЭС с суммарной мощностью 74 МВт: на Камчатке Мутновская, Паужетская, Верхне-Мутновская, и одна станция на острове Кунашир – «Менделеевская». По общей мощности это в 33 раза меньше, чем в США (мощность всех ГеоТЭС США равна 2444 МВт).

Кстати, на северо-западе США есть обширная геотермальная зона в районе Йеллоустонского супервулкана. В пользу того, что супервулкан «живой», помимо данных вулканологов, говорит тот факт, что здесь есть много действующих крупных гейзеров и грязевых вулканов. Последнее сильное извержение Йеллоустонского вулкана было 640 тысяч лет назад. Новое извержение вулкана грозит катастрофическими последствиями для большей части территории США. Дело не кончится только небывалым ущербом для сельского хозяйства. NASA предложило проект, который может уменьшить вероятность извержения этого вулкана [5]. В NASA считают, что строительство мощных ГеоТЭС со скважинами глубиной до 10 км приведет к охлаждению гигантского магматического пузыря под Йеллоустонской кальдерой. Циркулирующий поток воды через горячую породу унесёт избыточную температуру магмы.

Развитие исследований и применения геотермии в России

Обсуждая развитие геотермии, надо учитывать наличие геотермальных месторождений в



Рис. 1. ГеоТЭС Несьяведлир, Исландия. Электрическая мощность 120 МВт. Кроме того, станция вырабатывает 300 МВт тепловой энергии, которой отапливается столица Исландии – Рейкьявик («дымящаяся бухта»), насчитывающая 136 тысяч жителей. (Источник: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9f/NesjavellirPowerPlant_edit2.jpg/450px-NesjavellirPowerPlant_edit2.jpg)

рассматриваемой стране. Например, Германия по техническому уровню – лидер в странах ЕС, но в общемировом списке стран по развитию ГеоТЭС занимает только 18 место. В Германии есть немногочисленные давно потухшие вулканы на юге ФРГ, хотя геотермальные источники есть во всех регионах страны, особенно в земле Баден-Вюртемберг. По сравнению с Германией в России разведано 56 геотермальных месторождений, большинство которых находятся на Камчатке и Северном Кавказе. Всего в России более 170 вулканов, из которых 17 проявляли активность с 2000 года. На Камчатке действующими вулканами являются Шивелуч (последнее извержение 11 апреля 2023, когда столб вулканического пепла поднялся на высоту 20 км), Ключевская Сопка, Толбачик, Корякский, Горелый, Мутновский и другие.

На территории современной Кабардино-Балкарии 250 тысяч лет назад началось формирование вулкана Эльбрус: произошел прорыв магмы на поверхность очень древних палеозойских пород, которым сотни миллионов лет. Двухконусный вулкан Эльбрус сейчас представляет собой образование с диаметром основания около 20 км. Вулкан вырос не в один момент – между периодами активности были паузы покоя, длящиеся тысячи лет. Об этом свидетельствуют прослойки вулканического пепла между слоями других пород. Согласно данным радиоуглеродного анализа, полученным по органическому материалу из захороненных почвенных горизонтов, последние извержения Эльбруса имели место всего несколько тысяч лет назад [6, 7] <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D1%8C%D0%B1%D1%80%D1%83%D1%81> - cite_note-29. Из этого следует, что люди бронзового века могли наблюдать последнее извержение Эльбруса. Вообще Кавказ по геологическим понятиям – молодая горная система [8]. Вблизи потухших и действующих вулканов расположены геотермальные зоны, расположенные близко к дневной поверхности земли. Поэтому вокруг вулканических районов много горячих источников.

Большой вклад в технику использования подземного тепла и технологии извлечения

некоторых металлов из подземных флюидов вносят ученые и сотрудники Института проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН [9]. Благодаря трудам этого Института значительное развитие в республике получило геотермальное отопление жилых домов и теплиц и технология извлечения ценных компонентов из термальных вод – магния, кальция, стронция и особенно стратегического металла лития [10, 11]. Дело в том, что дефицит лития и значительное повышение мировых цен на него вызваны небывалым ростом в последние годы производства литий-ионных аккумуляторов. Эти источники энергии работают во всех мобильных электронных устройствах, электромобилях и в различных дронах гражданского и военного назначения.

Кроме того, в Институте проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН работают и над развитием теплотехнических схем геотермальных ТЭС, в том числе схемы с паровыми турбинами, использующих низкокипящее рабочее тело [12, 13], над повышением КПД ГеоТЭС. Эти работы имеют большое значение для всех регионов России, где имеются геотермальные месторождения.

Россия находится на начальном участке пути по использованию ветровой и солнечной энергии, в отличие от гидроэнергетики и геотермии, где за многие годы накоплены большие теоретические знания и практический опыт. Среди стран, использующих ВИЭ, на первом месте находится ветроэнергетика, не считая гидроэлектростанций, построенных в течение 20 века. В России ветроэнергетика стартовала несколько лет назад, когда госкорпорация «Росатом» [14] использовала зарубежный опыт по разработке и производству ветроэлектрических станций (ВЭС). После 2022 года производство сложных узлов ВЭС (крупногабаритные детали башни и лопастей из композитных материалов, планетарный редуктор, генератор, гидравлика, сенсоры, электронные комплектующие и др.) на территории РФ под большим вопросом.

Учитывая, что в Дагестане в прибрежной полосе Каспийского моря существует необходимый ветровой потенциал, в 2019 году

предложено использовать ВЭС для дополнительного снабжения электроэнергией, наряду с традиционными энергоносителями (газ, мазут) производства энергоемкой строительной теплоизоляции – керамзита и пеностекла [15]. Доказательством того, что в Дагестане достаточно сырья для производства керамзита, служит многолетняя успешная работа «Кизилюртовского завода керамзитового гравия».

Производство энергоемких строительных материалов: изделий из железобетона, силикатного кирпича, строительной керамики, теплоизоляции и добыча минерального сырья для предприятий стройматериалов, вносит большой углеродный след в окружающую среду [16], сравнимый с металлургическими заводами. Кроме того, в России в 2023 году планируется ввести в действие закон об ограничении выбросов парниковых газов.

Рост цен на углеводородные энергоносители, особенно заметный в отдаленных регионах России, повышает себестоимость строительных материалов. В связи с этим в данной работе рассматривается, каким основным критериям должны соответствовать геотермальные месторождения, пригодные для производства многих видов строительных материалов. Первые работы в России по использованию геотермальных месторождений для производства некоторых энергоемких строительных материалов опубликованы в 1996 г. [17-19].

Новая область использования геотермальной энергии

Тепло Земли, вырабатываемое за счет радиоактивного распада в глубине Земли урана, тория и калия-40, оценивается в 33 ± 20 ТВт. Таким образом, энергия радиоактивного распада компенсирует до 70% тепловые потери нашей планеты, излучаемые ею в космос. Обычно геотермический градиент вдали от геотермальных районов – всего 30°C на 1000 м глубины скважины. В вулканических районах термальные воды расположены ближе к поверхности земли, там геотермический градиент много больше, и циркулирующая под землей вода может перегреваться выше 100°C . Только благодаря давлению, существующему

на глубине, перегретая вода не кипит. Например, когда температура в паровом котле равна около 150°C , давление перегретой воды достигает примерно 5 атм.

Плотность теплового потока, поступающего через земную поверхность вдали от геотермальных районов, составляет $0,1 \text{ Вт/м}^2$. То есть примерно в десять тысяч раз меньше плотности излучения Солнца, падающего на земную поверхность по нормали, что затрудняет использование тепла Земли. Благодаря чему удастся концентрировать геотермальную энергию? Когда по пробуренным скважинам насосы поднимают горячую воду или вода сама изливается под действием пластового давления, мощный поток тепловой энергии вместе с водой попадает на дневную поверхность. Подземная вода контактирует со многими тысячами квадратных метров горячих горных пород и собирает тепловую энергию. За счет глубинного тепла Земли можно нагреть воду до $200\text{-}250^\circ\text{C}$ и выше. Главное, чтобы при этом стоимость глубокой скважины не превышала экономическую целесообразность использования геотермальной тепловой энергии при такой температуре. Себестоимость скважины нелинейно возрастает от её глубины.

Устройство, оборудование и технология проходки геотермальных скважин не слишком отличаются от конструкции нефтяных и газовых скважин. На себестоимость любой скважины, кроме глубины, очень сильно влияет ее диаметр, в первом приближении – от квадрата диаметра скважины, а также от горно-геологических условий прохождения бура. В России сейчас почти на всех геотермальных месторождениях используется фонтанный способ извлечения теплоносителя. Как очевидно, фонтанный способ наиболее простой, когда горячая вода изливается под действием внутрипластового давления. Фонтанный метод снабжения горячей водой энергетического и теплообменного оборудования станции грозит падением дебита. При такой технологии масштабы освоения геотермальной энергии незначительны.

Существенными недостатками фонтанного способа являются: ограниченность террито-

рий, в пределах которых возможно применение этого способа и снижение дебита за счет уменьшения гидростатического давления на пласт при достижении динамического уровня воды в скважине до 150-300 м [20]. Кроме того, при температуре 85°C и выше термальные воды характеризуются значительным солеотложением. Наличие в воде ионов кальция даже в небольшом количестве (они почти всегда присутствуют в геотермальной воде) вызывает нестабильность системы и приводит к выпадению карбонатных осадков в виде CaCO_3 в трубах и на стенках оборудования.

Вообще существуют еще способы извлечения тепла – насосный и циркуляционный. Чтобы исключить снижение дебита скважин и захоронение отработанных вод с вредными примесями, применяют циркуляционный способ с нагнетанием в коллектор отработанной геотермальной воды. Для глубоких скважин, вскрывающих водоносные горизонты с относительно высокими температурами в пласте, понижение уровня подземных вод не равно понижению уровня на устье скважины. Это следствие проявления эффектов термолифта и газлифта [21], а также гидравлических потерь напора в водоподъемных трубах эксплуатационной скважины. Для более крупного освоения геотермальных ресурсов с большой тепловой мощностью необходимо усложнять технологию. Кроме того, разрабатывать высокопроизводительные конструкции скважин, применять принудительную насосную откачку, стимуляцию гидротермальных коллекторов с низкой проницаемостью, широкое использование гидрогеотермальных циркуляционных систем и систем извлечения тепловой энергии горячих горных пород. В ряде случаев применять дополнительную перфорацию скважин на определенных горизонтах, чтобы повысить циркуляцию воды и теплосъем с горячих горных пород.

По нашим расчетам, чтобы повысить температуру теплоносителя с 100-110°C до 170-200°C, необходимых для автоклавной обработки, например, заготовок силикатного кирпича, нужна тепловая мощность геотермального месторождения минимум 5-6 МВт. Автоклавная

обработка силикатного кирпича необходима. Под действием водяного пара при высокой температуре и давлении 0,8-1,0 МПа изделия приобретают заданные свойства. Для этого нужно иметь геотермальное месторождение с постоянным дебетом 1500 м³/сут (в наших расчетах использованы данные по дебету и температуре флюида скважин из работы [22]).

Часть тепловой мощности из общей тепловой мощности геотермального месторождения 5-10 МВт можно преобразовать в теплоноситель (пар) с температурой 170-200°C. Повышение температуры можно осуществить на стандартном оборудовании: паровая турбина, работающая на низкокипящем рабочем теле с прямым приводом аэродинамического преобразователя (нагревателя). Мощность турбины 500-2500 кВт, в зависимости от суточной производительности цеха силикатного кирпича или ЖБИ. Исключение из цикла преобразования электрического дорогостоящего генератора и резистивного нагревателя, во-первых, снизит стоимость оборудования, во-вторых, повысит КПД аэродинамического преобразования (нагревателя) низкопотенциального теплоносителя в высокотемпературный, необходимый для производства большого перечня стройматериалов.

Целесообразность использования геотермальных месторождений для производства стройматериалов

Выбор геотермального месторождения оценивают по следующим критериям:

а) Какой вид стройматериала планируют производить. Какая максимальная температура по технологии необходима и достижима для производства данного строительного материала. Например, для производства силикатного кирпича и серийных ЖБИ необходима температура 170-200°C;

б) Какова цена привозимых с «материка» стройматериалов или производимого в данном регионе, то есть сможет ли конкурировать по цене при равном качестве с привезенным или местным материалом. Например, только за два года из-за введения новых санкций и пандемии подорожание стройматериалов на Камчатке с 2020 года составило до 88% [23];

в) Цена и вид местных энергоресурсов и состояние энергосистемы данного региона. В этом плане показательна ситуация в Камчатском крае. Главной особенностью энергетики Камчатского полуострова является оторванность от энергосистем других регионов и большое разнообразие генерирующего оборудования, что удорожает его ремонт и обслуживание. Это определяется не только исключительной малонаселенностью северо-востока страны и отсутствием дорог, но и особым географическим положением Камчатского края. Основная масса источников электроэнергии и тепла Камчатского края работает на привозном топливе. Годовая потребность энергетических объектов в поставках топлива составляет (2009 год): 450 тыс. тонн мазута, 25 тыс. тонн дизельного топлива, 200 тыс. тонн угля [24]. Данные для декабря 2022 года: дизельного топлива поставлено 25,4 тысячи тонн, то есть потребность в дизтопливе за 13 лет почти не изменилась (?), данные по мазуту отсутствуют [25]. Геотермальными электростанциями выработано около 30% от объема производимой электроэнергии. Вклад ГЭС и ВЭС в энергетику Камчатки очень мал – около 3% электроэнергии.

Видно, что привозной уголь, мазут и дизельное топливо на Камчатке очень дефицитные и дорогие. Пустить их на производство стройматериалов – крайне расточительно. Потому дорогое топливо на Камчатке, что его везут танкерами и сухогрузами за тысячи миль из портов Дальнего Востока. В себестоимости стройматериалов, производимых на «материке», стоимость энергоносителей составляет 40-60%. На Камчатке выпускать энергоемкие стройматериалы, затрачивая на производство привозное дорогое топливо, – это значит работать себе в убыток. Так получается вследствие значительно большего вклада по цене дорогой топливной составляющей в себестоимость производимых стройматериалов.

Таким образом, везде, где есть геотермальные месторождения с тепловой мощностью

5-10 МВт и местное сырье, там можно производить некоторые стройматериалы с помощью тепловой энергии геотермальных месторождений. Производимые стройматериалы могут быть конкурентными по цене с местными или привозными стройматериалами. Итак, целесообразно исследовать геотермальные месторождения на предмет промышленного их освоения и проектировать предприятие по выпуску некоторых энергоемких строительных материалов.

Выводы:

1. Камчатский край и Северный Кавказ обладают большими запасами энергетических геотермальных вод, многие из которых имеют температуру выше 80-90°C и тепловую мощность более 5-6 МВт. Накопленные знания в России по практическому применению геотермии позволяют рассматривать геотермальные воды в качестве энергетического ресурса для расширения выработки не только электроэнергии, но и для производства многих энергоемких строительных материалов и обеспечения ими местного строительного рынка.

2. Низкопотенциальный теплоноситель с температурой 80-110°C следует преобразовать в теплоноситель (пар) с температурой 170-200°C, необходимой для производства многих строительных материалов. Повышение температуры можно осуществить на стандартном оборудовании: паровая турбина, работающая на низкокипящем рабочем теле с прямым приводом аэродинамического преобразователя (нагревателя). Мощность турбины на валу 500-2500 кВт, в зависимости от суточной производительности цеха по выпуску того или иного строительного материала. Исключение из цикла преобразования электрического генератора и резистивного нагревателя снизит стоимость оборудования и повысит КПД аэродинамического преобразователя (нагревателя) для повышения температуры до уровня, необходимого по технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райт Дж.К. Переход от ископаемого топлива к альтернативным источникам – роль крупной электроэнергетической компании. Лондон, Англия, 1985.
2. VERKÍS. Геотермальные станции, проектирование и консалтинг. 2012. <https://web.archive.org/web/20141029232709/http://www.verkis.com/media/pdf-russian/Verkis-Geothermal-rus.pdf> (дата обращения: 10.03.2023).
3. Мрочек Э. Извлечение лития из геотермальных флюидов Вайракей с использованием электродиализа / Э. Мрочек, Г. Дедуал, Д. Грэм, Л. Бэкон // Труды конгресса «World Geothermal 2015». Мельбурн, Австралия.
4. Френкель М. Интеркаляция ионами лития кристаллической модификации свежесозданного гидроксида алюминия / М. Френкель, А. Гласнер, С. Дж. Сариг // Phys. хим. 1980.
5. Йеллоустонский супервулкан готовится взорвать свою пробку (дата обращения: 10.03.2023).
6. Масуренков Ю.П. Кайнозойский вулканизм Эльбрусской вулканической области. Москва: Издательство АН СССР, 1961. 85 с.
7. Лебедев В.А. Геохронология извержений и источники вещества материнских магм вулкана Эльбрус (Большой Кавказ): результаты К-Ar и Sr-Nd-Pb изотопных исследований / В.А. Лебедев, И.В. Чернышев, А.В. Чугаев, Ю.В. Гольцман, Э.Д. Баирова // Геохимия. 2010. №1. С. 45-73.
8. Богатиков О.А., Мелекесцев И.В., Гурбанов А.Г. и др. Радиоуглеродное датирование голоценовых извержений вулкана Эльбрус (Северный Кавказ, Россия) // Доклады РАН. 1998. Т. 363. №2. С. 219-221.
9. Разработка эффективной технологии комплексного освоения высокопараметрических минерализованных гидрогеотермальных ресурсов / Институт проблем геотермии Дагестанского НЦ РАН. 2014. http://www.ipgdncran.ru/files/file/Lot_14_604_21_01_20/Otchet%20PNI-2.pdf http://www.ipgdncran.ru/files/file/Lot_14_604_21_01_20/Otchet%20PNI-2.pdf (дата обращения: 10.03.2023).
10. Ахмедов А.К., Рамазанов А.Ш., Максин В.И. Раздельное извлечение соединений магния, кальция, стронция из геотермальных рассолов хлоридно-натриевого типа // Химия и технология воды. 1991. 13. №10. С. 944-947.
11. Рамазанов А.Ш., Каспарова М.А., Сараева И.В. и др. Состав, структура и свойства литий-алюминиевого концентрата, выделенного из геотермальной минерализованной воды // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и технология. 2013. Т. 56. №1. С. 21-25.
12. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А. Современное состояние и перспективы освоения геотермальных ресурсов Северо-Кавказского региона // Теплоэнергетика. 2014. №6. С. 28-34.
13. Морозов Н.В., Карасев В.П. Паровые турбины на низкикопящем рабочем теле // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. М.Ф. Решетнева. Вып. 2 (28). 2010. С. 102-106.
14. Госкорпорация «Росатом» вышла на рынок ветроэнергетики в 2016 году. <https://rosatom.ru/production/vetroenergetika/> (дата обращения: 10 февраля 2023).
15. Кокоев М.Н., Федоров В.Т., Хаджишалапов Г.Н. Ветроэнергетика в производстве пеностекла и керамзита // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019. 46 (1). С. 187-194.
16. Бельский А.А., Яковлева Э.В. Обоснование возможности использования возобновляемых источников энергии для энергоснабжения объектов минерально-сырьевого комплекса // Альтернативная энергетика и экология. Саров. №02/2 (120). 2013. С. 63-67.
17. Кокоев М.Н., Федоров В.Т. Возможности применения геотермальной энергии в производстве строительных материалов // Строительные материалы. 1996. №5. С. 2-3.
18. Федоров В.Т., Кокоев М.Н. Новый метод использования геотермальной энергии // ЭНЕРГИЯ: экономика-техника-экология. 1996. №11. С. 12-15.
19. Кокоев М.Н. Эксплуатация геотермальных месторождений и сейсмическая активность // Вестник КБГУ. Серия: Технические науки. Вып. II. 1997. С. 34-35.
20. Ниналапов А.И., Матаев Г.А., Малачиханов Т.Б. Прогнозирование теплоотдачи геотермальной скважины // Термомеханика геотермальных систем. Сб. научн. тр. Махачкала:

- Даг. ФАН СССР, Институт проблем геотермии, 1990. С. 31-41.
21. *Алхасов А.Б.* Возобновляемые источники энергии. Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. 271 с. [Электронный ресурс] <https://www.studik.kiev.ua/wp-content/uploads/2018/04-2016.pdf> (дата обращения: 10.02. 2023).
 22. *Акаев А.И., Ниналалов А.И.* Методика расчета оптимальной теплоотдачи геотермальной скважины // Вестник ДагГТУ. Технические науки. №1 (36). 2015. С. 53-62.
 23. Подорожание стройматериалов на Камчатке с 2020 года составило до 88%. <https://ok.ru/kamtoday/topic/154286493274124> (дата обращения: 10.03.2023).
 24. *Суглобов А.Е., Древинг С.Р., Петренко В.А.* Состояние и особенности энергосистемы Камчатки // Регион. экономика: теория и практика. 2009. №12 (апр.). С. 2-9. <https://kamgov.ru/news/v-2022-godu-polnostu-obespechen-zavoz-topliva-v-severnye-rajony-kamchatki-58497?ysslid=lgq5akfoia296584494> (дата обращения: 10.03.2023).
 25. *Муртазаев С.А.Ю., Саламанова М.Ш., Габашев А.А.* Испытание грунтов оснований под здания и сооружения // Вестник ГГНТУ. Технические науки. 2022. Т. 18. №1 (27). С. 77-83.

SELECTION OF GEOTHERMAL ENERGY SOURCES TO POWER PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS

© M.N. Kokoev¹, V.T. Fedorov²

¹KBSU named after H.M. Berbekov, Nalchik, Russia

²Concern "Nanoindustry", Moscow, Russia

The production of building materials such as construction ceramics, sand-lime bricks, reinforced concrete products, etc. and the extraction of mineral raw materials for construction supplies contributes a large carbon footprint to the environment. This causes damage to nature, comparable in magnitude to metallurgical plants. The continuing rise in energy prices increases the cost of building materials. The first work in Russia on the use of geothermal deposits for the production of energy-intensive building materials appeared in 1996. Criteria for geothermal deposits suitable for raw material extraction and processing are considered. Most geothermal fields have a water temperature of no higher than 80-90°C with sufficient thermal power of the field. A method is proposed for obtaining temperatures of 200°C and above from a low-temperature heat transfer agent, which is necessary for the production of some building materials. The transformation is carried out according to the scheme: a steam turbine on a low-boiling working fluid - an aerodynamic converter (heater). Eliminating the electrical generator and resistance heater improves efficiency and reduces the cost of high temperature equipment.

Keywords: production of building materials, geothermal energy source, aerodynamic converter (heater).

REFERENCES

1. Wright, J.K. (1985). *Transition from fossil fuels to alternative sources - the role of a large electrical utility*. London, England.
2. (2012). VERKIS. *Geothermal stations, design and consulting*, available at: <https://web.archive.org/web/20141029232709/http://www.verkis.com/media/pdf-russian/Verkis-Geothermal-rus.pdf> (Accessed 10.03.2023).
3. Mroczek, E., Dedual, G., Graham, D. and Bacon, L. (2015). 'Lithium Extraction from Wairakei Geothermal Fluid using Electrodialysis'. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
4. Frenkel, M., Glasner, A. and Sarig, S.J. (1980). *Crystal Modification of Freshly Precipitated Aluminum Hydroxide by lithium Ion*. Intercalation. Phys. Chem. V. 84, p. 507-510.
5. Yellowstone supervolcano getting ready to blow its cork, available at: <https://web.archive.org/web/20111031202406/http://www.earthmountainview.com/yellowstone/yellowstone.htm> (Accessed 10.03.2023)

6. Masurenkov, Yu.P. (1961). *Cenozoic volcanism of the Elbrus volcanic region*. Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, Moscow, 85p.
7. Lebedev, V.A., Chernyshev, I.V., Chugaev A.V., Gol'cman Yu.V. and Bairova, E.D. (2010) 'Geochronology of eruptions and sources of parental magmas of the Elbrus volcano (Greater Caucasus): results of K-Ar and Sr-Nd-Pb isotopic studies'. *Geochemistry*. №1, pp. 45-73.]
8. Bogatikov, O.A., Melekestsev, I.V. and Gurbanov, A.G. (1998). 'Radiocarbon dating of Holocene eruptions of the Elbrus volcano (North Caucasus, Russia)'. *Doklady RAN*. V. 363, №2, pp. 219-221.
9. (2014). Development of an effective technology for the integrated development of high-parametric mineralized hydrogeothermal resources. Institute of Geothermal Problems of the Dagestan Scientific Center of the RAS, available at: http://www.ipgdncran.ru/files/file/Lot_14_604_21_01_20/Otchet_%20PNI-2.pdfhttp://www.ipgdncran.ru/files/file/Lot_14_604_21_01_20/Otchet%20PNI-2.pdf (Accessed 10.03.2023).
10. Ahmedov, A.K., Ramazanov A.Sh. and Maksin, V.I. (1991). 'Separate extraction of magnesium compounds, calcium, strontium from geothermal brines of sodium chloride type'. *Chemistry and Technology water*. 13. №10, pp. 944-947.
11. Ramazanov A.Sh., Kasparova M.A., Saraeva, I.V. et al. (2013). 'Composition, structure and properties of lithium aluminum concentrate isolated from geothermal mineralized water'. *News of higher educational institutions. Series: Chemistry and technology*.
12. Alkhasov, A.B. and Alkhasova, D.A. (2014). 'Current state and development prospects geothermal resources of the North Caucasian region'. *Heat power engineering*.
13. Morozov N.V. and Karasev V.P. (2010). 'Steam turbines on a low-boiling working body'. *Bulletin of the Siberian State Aerospace University*. M. F. Reshetnev. Issue: 2 (28).
14. Rosatom State Corporation entered the wind energy market in 2016, available at: <https://rosatom.ru/production/vetroenergetika/> (Accessed 10 February 2023).
15. Kokoev, M.N., Fedorov, V.T. and Khadzhishalapov, G.N. 'Wind energy in the production of foamglass and expanded clay'. *Bulletin of Dagestan State Technical University. Technical Sciences*.
16. Belskij, A.A. and Yakovleva, E.V. (2013). 'Substantiation of the possibility of using renewable energy sources for energy supply of objects of the mineral resource complex'. *Alternativnaya energetika i ekologiya*. № 02/2 (120), Sarov, pp. 63-67.
17. Kokoev, M.N., Fedorov, V.T. Kokoev, M.N. and Fedorov, V.T. (1996). 'Possibilities of using geothermal energy in the production of building materials'. *Building materials*. №5, pp. 2-3.
18. Fedorov, V.T. and Kokoev, M.N. (1996). 'A new method of using geothermal energy'. *ENERGY: economics-technics-ecology*, №11, pp. 12-15.]
19. Kokoev, M.N. (1997). 'Exploitation of geothermal deposits and seismic activity'. *Bulletin of KBSU. Series: Engineering sciences*. Issue. II, pp. 34-35.]
20. Ninalalov, A.I., Mataev, G.A. and Malachikhanov, T.B. (1990). 'Prediction of heat transfer from a geothermal well'. *Thermomechanics of geothermal systems. Sat. scientific tr. Makhachkala: Doug. FAN USSR, Institute of Geothermal Problems*, pp. 31-41.
21. Alhasov, A.B. (2016). *Renewable energy sources*. Moscow. MPEI Publishing House, available at: <https://www.studik.kiev.ua/wp-content/uploads/2018/04-2016.pdf> (Accessed 10.02.2023).
22. Akaev, A.I. and Ninalalov, A.I. (2015). Method for calculating the optimal heat transfer of a geothermal well. *Bulletin of DagGTU. Technical science*. №1 (36), pp. 53-62.]
23. The rise in the price of building materials in Kamchatka since 2020 has amounted to 88%, available at: <https://ok.ru/kamtoday/topic/154286493274124> (Accessed 10.03.2023)
24. Suglobov, A.E., Dreving, S.R. and Petrenko, V.A. (2009). 'Status and features of the energy system of Kamchatka'. *Region. economics: theory and practice*. No. 12 (April). pp. 2-9.], available at: <https://kamgov.ru/news/v-2022-godu-polnostu-obespecen-zavoz-topliva-v-severnnye-rajony-kamcatki-58497?ysclid=lgq5akfoia296584494> (Accessed 10.02.2023).
25. Murtazaev, S.A. Yu., Salamanova, M.Sh. and Gabashev, A.A. (2022). 'Testing of foundation soils under buildings and structures'. *Bulletin of GGNTU. Technical science*. V. 18. №1 (27). Pp. 77-83.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ

© М.Ш. Саламанова^{1,2}, Р.Г. Бисултанов,¹ М.М. Мовсулов¹

¹ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, Грозный, Россия

²КНИИ им. Х.И. Ибрагимова РАН, Грозный, Россия

Технология производства тяжелых бетонных композитов ориентирована на применение качественных заполнителей, как крупных, так и мелких, но рынок инертного материала во многих регионах нашей страны ограничен. В связи с этим в последние годы предпочтение отдается мелкозернистым бетонам, в которых отсутствует крупный заполнитель и для компенсации отсутствия жесткого каркаса используются различные технологические мероприятия, улучшающие качественные показатели композитов. В работе приводятся результаты исследований по проектированию составов мелкозернистых бетонов с использованием технологического приема по обогащению заполнителя с последующей его поверхностной обработкой. Получены классы мелкозернистых бетонов В25-35, что позволит использовать данные наработки для производства тонкостенных плоских и криволинейных конструкций, безнапорных и низконапорных труб, элементов мощения и др. продукции.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон, гидрофобизация, фракционированный заполнитель, суперпластификатор, минеральный порошок, композиционные вяжущие, модификация.

Формат цитирования: Саламанова М.Ш., Бисултанов Р.Г., Мовсулов М.М. Возможности получения качественных мелкозернистых композитов // Вестник ГГНТУ. Технические науки. №2. Том XIX. 2023. С. 94- 101. DOI: 10.26200/GSTOU.2023.56.39.011

Производство бетонов на современном этапе претерпело существенные изменения, и нынешние рецептуры композитов отличны от прежних аналогов, в составе которых можно увидеть композиционные вяжущие вещества, фракционированные крупные и мелкие заполнители, минеральные наполнители природного и техногенного происхождения, различные пластифицирующие добавки, типа водоредуцирующих, воздухововлекающих, замедлителей или ускорителей твердения и др. [1-5].

Технология производства тяжелых бетонных композитов ориентирована на применение качественных заполнителей, как крупных, так и мелких, но рынок инертного материала во многих регионах нашей страны ограничен. В связи с этим в последние годы предпочтение уделяется мелкозернистым бетонам, в которых отсутствует крупный заполнитель и для компенсации отсутствия жесткого каркаса используются различные технологические мероприятия, улучшающие качественные показатели композитов [6-10]. Ведь организация бетонирования тонкостенных плоских и криволинейных конструкций, безнапорных и низконапорных труб, элементов мощения, изготовления

ударостойких и изгибаемых элементов нецелесообразна без применения тщательно подобранных мелкозернистых бетонных смесей. Но использование в производстве данной продукции сталкивает нас с такими проблемами, как невысокий предел прочности при изгибе, сравнительно повышенный расход вяжущего и водопотребности, что в дальнейшем негативно отразится на качестве бетонных изделий и конструкций, из-за образования усадочных деформаций и ползучести, появления внутренних напряжений и скапливания микродефектов. Поэтому проблемы производства качественных мелкозернистых бетонов существуют по настоящее время и требуют новых технологических решений для создания прочных и долговечных композитов [11, 12, 14].

В данной работе предлагаются следующие технические подходы получения качественного мелкозернистого бетона:

– использование фракционированного искусственного мелкого заполнителя из отходов дробления горных пород;

– модифицирование заполнителя гидрофобизирующей добавкой алкилдиметилбензилламоний хлорид (АДМАХ);

– введение в вяжущую систему минерального порошка высокой удельной поверхности из тонкомолотых кварцевых песков;

– применение современных пластифицирующих добавок на основе эфиров поликарбонилатов;

– добавление в формовочную смесь фибр различного состава и происхождения.

Комплексное применение всех перечисленных составляющих бетонной смеси и технологический прием, заключающийся в снижении влагопоглощения мелкого заполнителя за счет модифицирования поверхности, позволит улучшить прочностные показатели и долговечность композита. Известен факт, что минеральные обломки в природе образовывались в процессе выветривания и естественной цементации по дефектным зонам структуры и кристаллов, плоскостям спайности и микродефектам [15]. Поверхность мелкого заполнителя достаточно гидрофильна, и связано это с концентрацией протоно-донорных центров, участвующих в формировании водородных связей с молекулами воды, и с количеством примесных центров на поверхности песка, на которых также может происходить адсорбция воды, что в итоге приведет к увеличению влагопоглощения [12, 13]. Приведенные в таблице 1 результаты исследований подтверждают выдвинутую концепцию и наглядно демонстрируют зависимость влагопоглощения поверхности заполнителя от размера частиц и природы материала.

Минимальный процент влагопоглощения и количества примесей свойственен отходам дробления горных пород, обогащение этого материала с последующей поверхностной гидрофобизацией катионактивным АДМАХ обеспечит гарантированную прочность бетона. Для проведения эксперимента исполь-

зовался портландцемент производства АО «ЧЕЧЕНЦЕМЕНТ», марки ЦЕМ I 42,5 Н. Для получения композиционного вяжущего был приготовлен минеральный порошок из чистых кварцевых мелких песков (модуль крупности 0,9), которые подвергали тонкому измельчению в роликовой мельнице в течение 20 минут до удельной поверхности 560 м²/кг (определяли на приборе ПСХ-12). В результате лабораторного эксперимента была определена оптимальная дозировка содержания минеральной добавки в составе вяжущей связки и составила она 20% от массы основного цемента. Распределение частиц по размерам в зависимости от вида вяжущего изучали на установке MicroSizer 201, позволяющей сканировать частицы в размерном диапазоне 0,2 – 600 мкм (рисунок 1).

Кривая распределения по размерам без добавочного цемента одномодальная, равномерная с четко выраженным пиком в диапазоне частиц 27,8 – 48,5 мкм в сравнении с композиционным цементом КЦ – 80. Кривая распределения частиц композиционного цемента смещена в область 3,11 – 19,3 мкм. Наглядно рассматриваются три четко выраженных пика, что характерно для благоприятных условий зарождения кристаллогидратов.

Присутствие прерывистого гранулометрического состава КЦ–80 положительно скажется на структуре цементного камня, за счет наличия мелкой фракции микрочастичек конечная пористость образцов уменьшится на 10–15%, повышая непроницаемость и прочность мелкозернистого бетона.

В мелкозернистых бетонах, как говорилось ранее, ключевая роль отводится мелкому заполнителю, в работе для получения качествен-

Таблица 1

Зависимость влагопоглощения заполнителя от размера и природы

Заполнитель	Количество примесей, %	Размер, мм	Влагопоглощение, %
Вольский песок	1,54	0,51–0,91	0,193
Червленский песок	2,41	0,26–0,51	0,347
Отсев дробления	0,16	0,91 и >	0,074

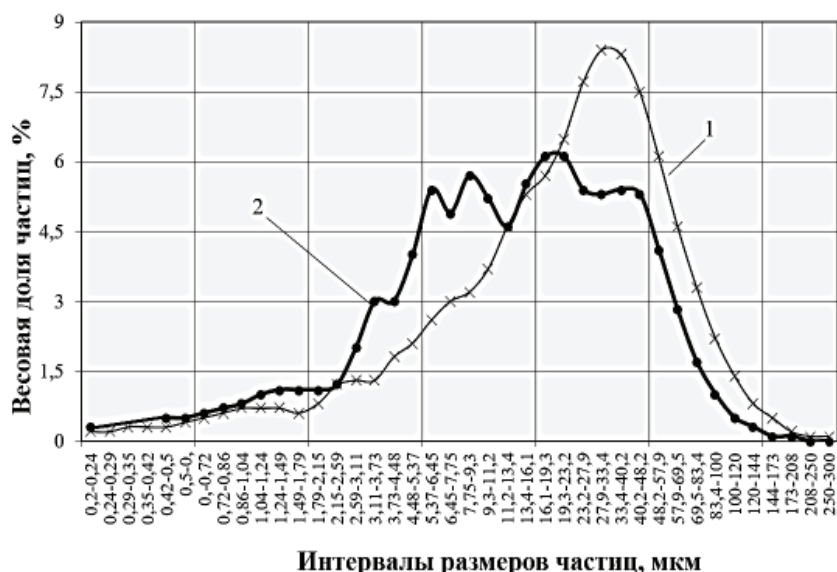


Рис. 1. Распределение частиц по размерам в зависимости от вида вяжущего, 1 – портландцемент, 2 – композиционный цемент КЦ-80

ных формовочных смесей использовался обогащенный мелкий заполнитель, полученный смешиванием мытых отсевов от дробления известняков ($M_k = 3,9$) (рисунок 2) и кварцевых песков ($M_k = 1,9$) для восполнения дефицита тонкой фракции. Результаты обогащения (таблица 2) показали, как изменяется пустотность заполнителя в зависимости от варьирования долями отсева дробления к кварцевому песку, следует отметить, что минимальный процент пустотности получен при смешивании материалов в соотношении ОД/П = 1/1. Далее полученный таким образом заполнитель подсушивался до влажности не более 1% и обрабатывался алкилдиметилбензиламмоний хлоридом в дозировке 0,1% от массы портландцемента. После обработки заполнителя процесс приготовления бетонной смеси проходил аналогично традиционной технологии бетона.

В качестве пластифицирующей добавки в бетонную смесь с водой затворения вводился жидкий суперпластификатор SikaViscoCrete 5 New (1,2% от массы портландцемента) на основе поликарбоксилатных эфиров.

Таким образом, по такому алгоритму с использованием заявленных компонентов были приготовлены составы модифицированных мелкозернистых бетонных смесей, рецептуры которых представлены в таблице 2.

Необходимо отметить, что по всем сериям образцов подготовленная формовочная мелкозернистая бетонная смесь соответствовала по подвижности классу П4 с распылом конуса от 16 до 18 см, и это благодаря комплексному действию суперпластификатора SikaViscoCrete 5 New (1,2% от массы портландцемента) и поверхностной модификации заполнителя алкилдиметилбензиламмоний хлоридом в дози-

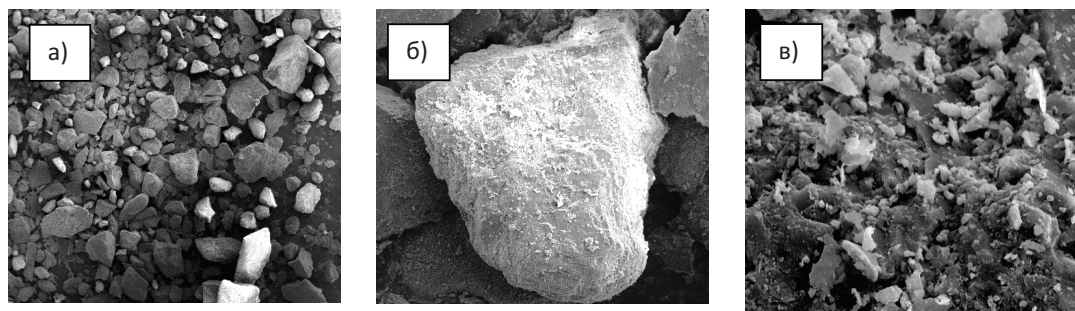


Рис. 2. Форма и рельеф поверхности частичек отсева дробления при различном увеличении

ровке 0,1% от массы портландцемента. Гидрофобизация самого объемного в составе бетона компонента направлена на снижение водоцементного отношения, за счет обмазывания поверхности мелкого заполнителя АДМАХ, вода затворения не проникает внутрь и расходуется по назначению только на процессы гидратации клинкерных минералов.

Далее по всем сериям составов были изготовлены образцы кубики размером 100 мм, которые твердели в нормально-влажностных условиях при температуре $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажности 90-95%, и испытывались через определенные промежутки времени на гидравлическом прессе Р-100, результаты испытаний приводятся в таблице 3.

Анализируя полученные результаты, можно констатировать, что гранулометрический состав заполнителя имеет определенную значимость, при равном соотношении отсева дробления к песку наблюдается максимальный прирост прочности при сжатии 46,3 МПа, что соответствует классу В35 бетона. Следует заметить, что расход композиционного цемента КЦ-80 оставался во всех составах постоянным. Следовательно, с уменьшением пустотности фракционированного заполнителя плотность и прочность бетона одновременно повышают-

ся, что характерно для более непроницаемого и долговечного цементного камня, значение водопоглощения 5,1% этому свидетельствует. Установлена зависимость прироста прочности от пустотности заполнителя и водопоглощения, плотности от водопоглощения бетона и водопоглощения от соотношения расхода песка к отсеvu дробления (рисунок 3).

Полученные зависимости позволяют оценить возможности варьирования свойствами бетонного композита при изменении зернового состава мелкого заполнителя, использование песка с модулем крупности 1,8 привело к повышению водопоглощения, несмотря на поверхностную модификацию материала АДМАХ, что впоследствии снижает плотность и прочность бетонного камня. Оптимальное соотношение природного кварцевого песка к отсевам дробления (1/1) дало возможность получения сравнительно высоких показателей, конечно же свою весомую роль выполнило и композиционное вяжущее КЦ-80, использование 20% тонкодисперсного минерального порошка из чистых кварцевых песков способствовало созданию плотной и непроницаемой упаковки цементного камня. Следовательно, получение качественных мелкозернистых бетонов требует технологического решения, за-

Таблица 2

Составы мелкозернистых бетонов

№ состава	Расход материалов, кг/м ³							Соотношение П/ОД	Пустотность заполнителя %
	ПЦ	МП	ОД	П	В	SikaVC 5 New	АДМАХ		
1	496	145	–	1560	224	5,9	0,5	1/0	29,4
2	496	145	390	1170	213	5,9	0,5	4/1	26,7
3	496	145	520	1040	210	5,9	0,5	2/1	26,0
4	496	145	780	780	198	5,9	0,5	1/1	24,2
5	496	145	1170	390	203	5,9	0,5	0,5/1	28,6
6	496	145	1560	–	200	5,9	0,5	0/1	38,8

Примечание: ПЦ – портландцемент, МП – минеральный порошок из тонкомолотых кварцевых песков удельной поверхности 560 м²/кг, ОД – отсев дробления известняков, П – кварцевый песок, В – вода затворения

Свойства мелкозернистых бетонов

№ со- става	Плотность бетона, кг/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа		Водопоглощение, %
		7	28	
1	2386	28,0	40,0	8,0
2	2392	30,3	42,1	7,6
3	2395	32,9	45,2	6,8
4	2399	34,7	46,3	5,1
5	2394	32,5	45,1	6,9
6	2381	23,7	38,2	8,5

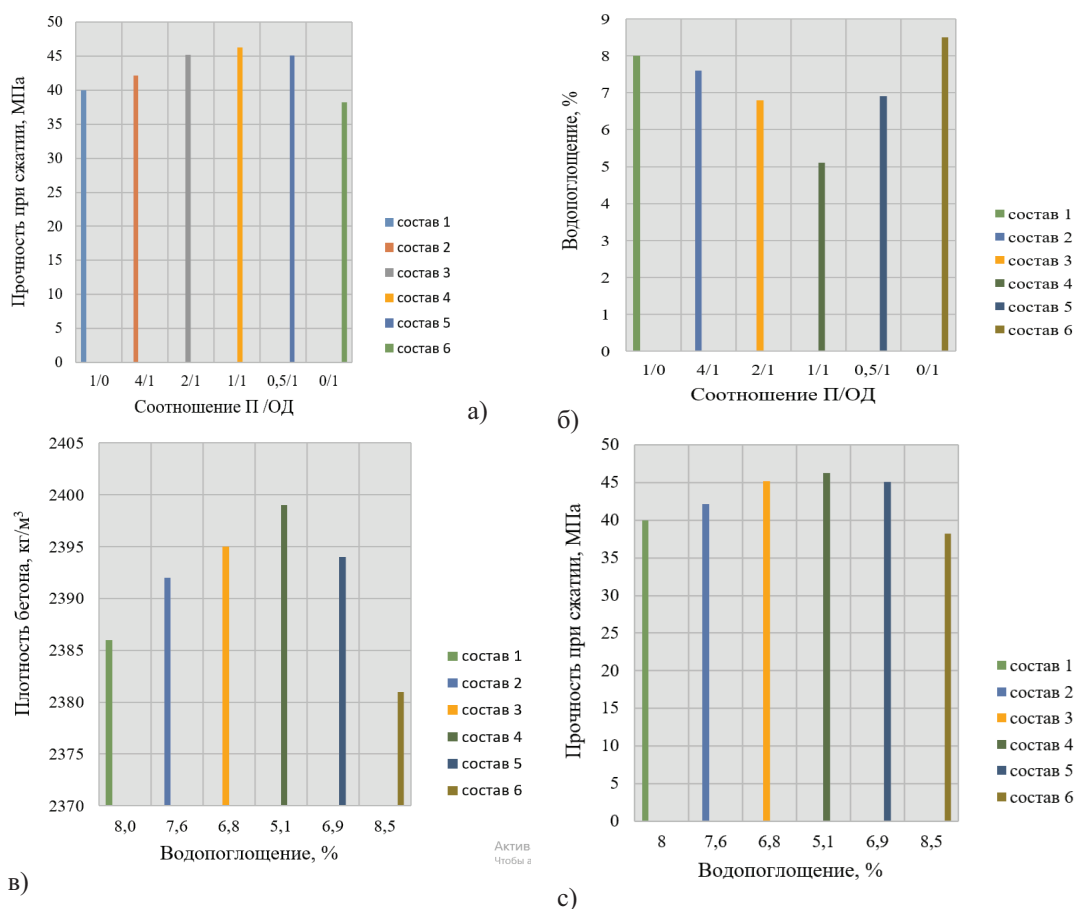


Рис. 3. Зависимости влияния granulometрии заполнителя на прочность бетона (а), водопоглощение (б), водопоглощения на плотность композита (в) и прирост прочности (с)

ключающегося в комплексном использовании фракционированных заполнителей с дальнейшей модификацией поверхности катиоактивной добавкой, композиционного вяжущего с 20% тонкодисперсной фракции SiO₂ и применением современных пластифицирующих до-

бавок на основе эфиров поликарбоксилатов. Полученные в исследованиях составы мелкозернистых бетонов позволят создавать эксплуатационно надежную железобетонную и бетонную продукцию с гарантированной прочностью и долговечностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ицкович С.М.* Заполнители для бетона. Минск: Высшая школа, 1983. 216 с.
2. *Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашиников В.И.* Модифицированные высококачественные бетоны. М.: АСВ, 2006. 289 с.
3. *Баженов Ю.М.* Бетон: технологии будущего // Строительство: новые технологии – новое оборудование. М.: ИД «Панорама», 2009. №8. С. 29-32.
4. *Hillemeier B., Buchenau G., Herr R., Huttl R., Klubendorf St., Schubert K.* Spezialbetone, Betonkalender, Ernst & Sohn, 2006. №1. Pp. 534-549.
5. *Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Бисултанов Р.Г.* Влияние тонкодисперсных микронаполнителей из вулканического пепла на свойства бетонов // Сборник статей международной научно-практической конференции, посвященной 95-летию ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, 24-26 марта 2015 г., Грозный. Т. 1. С. 171-176.
6. *Калашиников В.И.* Промышленность нерудных строительных материалов и будущее бетонов // Строительные материалы. 2008. №3. С. 20-24.
7. *Гаркави М.С., Якубов В.И.* Отсевы дробления – эффективный способ повышения качества бетонов // Строительные материалы. 2006. №11. С. 13-17.
8. *Муртазаев С-А.Ю.* Использование в мелкозернистых бетонах отходов переработки горных пород / *С-А.Ю. Муртазаев, М.Ш. Саламанова, М.С. Сайдумов, М.И. Гишлакаева* // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Наука и образование в Чеченской Республике: состояние и перспективы», посвященной 10-тилетию со дня образования КНИИ РАН. Грозный, 2011. С. 181-184.
9. *Шлаин И.Б.* Разработка месторождений нерудного сырья. М.: Недра, 1985. 344 с.
10. *Каприелов С.С.* Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. Ч. II // Строительные материалы. 2008. №3. С. 9-13.
11. *Murtazayev S-A.Yu.* Fine-grained concretes with clinker-free binders on an alkali gauging / *S-A.Yu. Murtazayev, M.Sh. Salamanova, M.Sh. Mintsayev, R.G. Bisultanov* // Proceedings of the International Symposium «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 500-503.
12. *Bataev D.K-S.* Utilization of cement kiln dust in production of alkali-activated clinker-free Binders / *D.K-S. Bataev, S-A. Yu., Murtazayev, M.Sh. Salamanova, S.S. Viskhanov* // Proceedings of the International Symposium «Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research» dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1. Pp. 457-460.
13. *Murtazayev S-A.Yu.* Features of production of fine concretes based on clinkerless binders of alkaline mixing / *S-A.Yu. Murtazayev, M.Sh. Salamanova, A. Alashanov, Z. Ismailova* // 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019) Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 23-27 September 2019, Belgorod, 2019. Pp. 385-388.
14. *Несветаев Г.В.* Влияние некоторых минеральных добавок на свойства мелкозернистых бетонов / *Г.В. Несветаев, А.В. Козлов, Г.А. Козлов, И.А. Филонов* // Инженерный вестник Дона. 2022. №11 (95). С. 508-525.
15. *Несветаев Г.В., Корянова Ю.И., Иванчук Е.В.* Проектирование состава бетона на соответствие нескольким показателям качества // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2021. №6. С. 1-10.

OPPORTUNITIES FOR PRODUCING HIGH-QUALITY FINE-GRAIN COMPOSITES

©M.Sh. Salamanova, R.G. Bisultanov, M.M. Movsulov

GSTOU named after M.D. Millionshchikov, Grozny, Russia

The technology for the production of heavy concrete composites is focused on the use of high-quality aggregates, both large and small, but the market for inert material in many regions of our country is limited. In this regard, in recent years, preference has been given to fine-grained concretes, in which there is no large aggregate, and various technological measures are used to compensate for the absence of a rigid frame, which improve the quality indicators of composites. The paper presents the results of studies on the design of fine-grained concrete compositions using a technological method for enriching the aggregate with its subsequent surface treatment. Classes of fine-grained concrete B25 – 35 have been obtained, which will allow using these developments for the production of thin-walled flat and curved structures, non-pressure and low-pressure pipes, paving elements, and other products.

Keywords: fine-grained concrete, hydrophobization, graded aggregate, superplasticizer, mineral powder, composite binders, modification.

REFERENCES

1. Itskovich, S.M. (1983). *Aggregates for concrete*. Higher School, Minsk. 216 p.
2. Bazhenov, Yu.M., Demyanova, B.C. and Kalashnikov, V.I. (2006). Modified high-quality concretes. DIA, Moscow, 289 p.
3. Bazhenov, Yu.M. (2009). *Concrete: technologies of the future. Construction: new technologies – new equipment*. Publishing house “Panorama”. №8. Moscow, pp. 29-32.
4. Hillemeier, B., Buchenau, G., Herr, R., Huttel, R., Klubendorf, St. and Schubert, K. (2006). ‘Spezialbetone’. *Betonkalender, Ernst & Sohn*, №1, pp. 534-549.
5. Murtazaev, S.A.Yu., Salamanova, M.Sh. and Bisultanov, R.G. (2015) ‘Influence of finely dispersed microfillers from volcanic ash on the properties of concrete’. *Collection of articles of the international scientific-practical conference dedicated to the 95th anniversary of the GSTOU named acad. M.D. Millionshchikov, March 24–26, Grozny*, vol. 1, pp. 171-176.
6. Kalashnikov, V.I. (2008). ‘Industry of non-metallic building materials and the future of concrete’. *Construction materials*. №3. pp. 20-24.
7. Garkavi, M.S. and Yakubov, V.I. (2006). ‘Screenings of crushing – an effective way to improve the quality of concrete’. *Construction materials*. №11, pp. 13-17.
8. Murtazaev, S–A.Yu., Salamanova, M.Sh., Saidumov, M.S. and Gishlakaeva, M.I. (2011). ‘Use in fine-grained concrete wastes of rock processing’. *Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference “Science and Education in the Chechen Republic: Status and Prospects”, dedicated to the 10th anniversary of the Kh. Ibragimov Complex Institute of the Russian Academy of Sciences*. Grozny, pp.181-184.
9. Shlain, I.B. (1985). *Development of deposits of non-metallic raw materials*. Nedra. Moscow, 344 p.
10. Kapriellov, S.S. (2008). ‘Modified high-strength concretes of classes B80 and B90 in monolithic structures’. Part II. *Construction materials*. №3, pp. 9-13.
11. Murtazayev, S–A.Yu., Salamanova, M.Sh., Mintsayev, M.Sh. and Bisultanov, R.G. (2019). ‘Fine-Grained Concretes with Clinker-Free Binders on an Alkali Gauging’. *Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol.1, pp. 500-503.
12. Bataev, D.K–S., Murtazayev, S– A. Yu., Salamanova, M.Sh. and Viskhanov, S.S. (2019). ‘Utilization of Cement Kiln Dust in Production of Alkali-Activated Clinker-Free Binders’. *Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and*

- Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Atlantis Highlights in Material Sciences and Technology (AHMST). April 2019. Vol. 1, pp. 457-460.*
13. Murtazayev, S–A. Yu., Salamanova, M.Sh., Alashanov, A. and Ismailova, Z. F. (2019). ‘Features of production of fine concretes based on clinkerless binders of alkaline mixing’. *14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM 2019) Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 23–27 September 2019, Belgorod*, pp. 385-388.
 14. Nesvetaev, G.V., Kozlov, A.V., Kozlov, G.A. and Filonov, I.A. (2022). ‘Influence of some mineral additives on the properties of fine–grained concrete’. *Engineering Bulletin of the Don. №11 (95)*, pp. 508-525.
 15. Nesvetaev, G.V., Koryanova, Yu.I. and Ivanchuk, E.V.(2021). ‘Designing the composition of concrete for compliance with several quality indicators’. *Electronic network polythematic journal “Scientific works of KubSTU”*. №6, pp. 1-10.

ВЕСТНИК ГГНТУ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

2023. Том XIX. № 2 (32)

Редактор – *Таймасханова З.Р.*
Корректор, дизайн и верстка – *Черная А.В.*
Технический секретарь – *Алаудинова А.И.*

Выход в свет 24.06.2023
Формат 60x84/8. Печать офсетная
Усл. печ. л. 11,4. Тираж 350 экз. Заказ № 71

Свободная цена

Типография: ИПЦ ИП Цопанова А.Ю.
362002, г. Владикавказ, пер. Павловский, 3

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ №ФС77-79693 от 27 ноября 2020 г.

Журнал основан в 2001 г.