

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**Серия «Строительство.
Электротехника и химические технологии»**

Научный рецензируемый журнал

№ 1 (17), 2023

Тверь 2023

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2023. № 1 (17). 98 с.

Включает научные статьи, подготовленные на основе результатов исследований и экспериментальных разработок в области строительства, электротехники и химических наук, выполненных учеными и специалистами-практиками ведущих вузов и научно-исследовательских учреждений нашей страны и зарубежья. Представлены работы, соответствующие профилю издания по следующим научным специальностям: 2.1.5 Строительные материалы и изделия; 2.4.4 Электротехнология и электрофизика; 2.6.10 Технология органических веществ.

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Регистрационный номер: Эл № ФС77-74949 (онлайн) от 25 января 2019 г.

Индексируется в базе данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

ISSN 2686-794X (онлайн)

© Тверской государственный
технический университет, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Бабаев Д.Д., Петропавловский К.С., Данякин В.А., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б.</i> Утилизация фосфогипса в производстве строительных изделий.....	5
<i>Белов В.В.</i> Биокompозиты строительного назначения с использованием отходов деревообработки. Часть 1 (обзор).....	14
<i>Каляскин П.А., Петропавловская В.Б., Баркая Т.Р., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б.</i> Влияние типа армирования гипсобетона на его свойства.....	27

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Корнеев К.Б., Хрусталева М.С., Сизова В.В.</i> Анализ влияния электромобилей на функционирование электросетевой инфраструктуры города.....	42
<i>Попов И.П.</i> Влияние сети на реактивную мощность.....	55
<i>Прокофьев Д.А., Окунева В.В., Корнеев К.Б.</i> Энергоэффективная система автоматического управления охлаждением силового трансформатора.....	61

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Белоусова Ю.А., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., Степанов Е.Д., Соловьев К.Э.</i> Изучение эффективных каталитических процессов для получения ароматических прекурсоров в синтезе биологически активных веществ.....	70
<i>Качановский Ф.В.</i> Статистический анализ удлиняющегося ряда наблюдений за кислотностью осадков, выпадающих в Твери.....	79
<i>Маркова М.Е., Степачева А.А.</i> Влияние концентрации железа в катализаторе на процесс синтеза Фишера – Тропша.....	89

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Babaev D.D., Petropavlovskii K.S., Danyakin V.A., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B.</i> Utilization of phosphogypsum in the manufacture of building products.....	5
<i>Belov V.V.</i> Construction biocomposites using woodworking waste. Part 1 (overview).....	14
<i>Kalyaskin P.A., Petropavlovskaya V.B., Barkaya T.R., Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B.</i> Influence of gypsum concrete reinforcement type on its properties.....	27

ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Korneev K.B., Khrustalyova M.S., Sizova V.V.</i> Analysis of the impact of electric vehicles on the functioning of the power grid infrastructure of the city.....	42
<i>Popov I.P.</i> Network influence on reactive power.....	55
<i>Prokofev D.A., Okuneva V.V., Korneev K.B.</i> Energy efficient system of automatic control of power transformer cooling.....	61

CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Belousova Yu.A., Lakina N.V., Doluda V.Yu., Stepanov E.D., Soloviev K.E.</i> Study of effective catalytic processes for obtaining aromatic precursors in the synthesis of biologically active substances.....	70
<i>Kachanovsky F.V.</i> Statistical analysis of observations the precipitations acidity in Tver.....	79
<i>Markova M.E., Stepacheva A.A.</i> Effect of iron concentration in the catalyst on the Fischer – Tropesch synthesis.....	89

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 691.33

УТИЛИЗАЦИЯ ФОСФОГИПСА В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

*Д.Д. Бабаев, К.С. Петропавловский, В.А. Данякин,
В.Б. Петропавловская, Т.Б. Новиченкова*

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Бабаев Д.Д., Петропавловский К.С., Данякин В.А.,
Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б., 2023

Аннотация. В статье рассмотрена возможность использования промышленного отхода химической промышленности – фосфогипса – в составе сырьевых смесей с комплексом модифицирующих добавок, вводимых с целью повышения физико-механических и эксплуатационных характеристик композиционного вяжущего на основе фосфогипса. Установлено, что введение минеральных добавок отражается на свойствах фосфогипсового камня – прочности и средней плотности. Прочность затвердевшего камня возрастает в случае применения рационально подобранного состава сырьевой смеси с пластифицирующей добавкой, способствующей снижению водопотребности композиционного вяжущего и росту его прочности.

Ключевые слова: фосфогипс, гипсовое вяжущее, модифицирующая добавка, гиперпластификатор, прочность, водопотребность.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-5-13

Фосфогипс (ФСГ) – побочный продукт промышленного производства фосфорной кислоты, состоящей в основном из дигидрата сульфата кальция; этот гипс содержит фосфор, фтор, органические вещества и другие примеси [1]. Получение ФСГ создает глобальную экологическую проблему [2]. В Китае имеются значительные запасы ФСГ, и производство этого продукта увеличивается с каждым годом. В 2020 г. было произведено приблизительно 76 млн т ФСГ, но утилизировано только около 40 % [3]. Производство строительного гипса из ФСГ выступает одним из основных способов потребления производства фосфорной кислоты [4, 5]. Характеристики ФСГ значительно хуже природного строительного гипса, так как состав ФСГ более сложный [6]. Кроме того, морфология частиц, гранулометрический состав и кристалломорфология ФСГ отличаются от природного строительного гипса [7, 8].

В настоящее время для получения строительного гипса из ФСГ необходимы определенные методы предварительной обработки, такие как химические методы, в том числе нейтрализация [9], методы промывки водой [10], методы флотации [11], ситовые методы [12] и методы термической обработки [13, 14]. В качестве традиционного метода

предварительной обработки порошка при его использовании в цементной промышленности широко применяется измельчение в шаровой мельнице при приготовлении или модификации цемента [15–17]. Однако химическое измельчение в шаровой мельнице является вторичным методом, при котором для ФСГ или строительного гипса используются химические и «водные» методы, например промывка. Li [18] изучал влияние времени измельчения в шаровой мельнице на удельную площадь, распределение частиц по размерам, потребление воды, прочность образцов. Результаты показали, что наилучшие характеристики строительного гипса были получены, когда время измельчения в шаровой мельнице составило 3 мин. Если время измельчения увеличить, то характеристики строительного гипса не будут улучшены. Xiong [19] получил строительный гипс обжигом и старением молотого ФСГ. Результаты эксперимента продемонстрировали, что строительный гипс имел наилучшие характеристики, когда время измельчения в шаровой мельнице было равно 20 мин, а размер частиц составлял 25,5 мкм, но и в этом случае длительное время измельчения в шаровой мельнице отрицательно сказывалось на характеристиках строительного гипса. Предыдущие исследования были сосредоточены на изучении изменения водопотребности строительного гипса после его измельчения. В других экспериментах анализировались характеристики фосфогипсового строительного гипса после помола с использованием физико-механических показателей затвердевшего камня [20, 21]. В центре работ [21, 22] было влияние времени измельчения на дисперсность строительного гипса, постоянство физико-механических свойств в отношении водопотребности и достижения нормальной консистенции и влияния фиксированного расхода воды. Установлено воздействие помола в шаровой мельнице на физико-механические свойства изученного строительного гипса. Результаты получены с учетом требований стандарта GB/T 9775-2008. В работе [23] установлено, что HPO_4^{2-} ускоряет раннюю гидратацию полугидрата фосфогипса, сокращает время схватывания камня и улучшает механические свойства затвердевшей структуры. Отрицательные эффекты вызывает растворимый P_2O_5 , присутствующий в форме HPO_4^{2-} .

Данная работа посвящена исследованию возможности получения модифицированного вяжущего с улучшенными эксплуатационными и физико-механическими характеристиками (повышенной прочностью и оптимальной плотностью) на основе фосфогипсовых отходов и комплекса модифицирующих добавок. Целью работы являлось установление взаимосвязи между характеристиками сырьевых компонентов и физико-механическими свойствами твердеющего модифицированного фосфогипсового камня, а также выявление механизма влияния микроармирующих и пластифицирующих добавок. В качестве основного компонента композиционного вяжущего был взят фосфогипсовый порошок (полугидрат сульфата кальция) с Воскресенского завода минеральных удобрений (рис. 1).

В качестве структурообразующей добавки применялось гипсовое вяжущее марки Г-16 Самарского гипсового комбината со следующими характеристиками:

- остаток на сите с размерами ячеек в свету 0,2 мм не более 1 %;
- сроки схватывания: начало 4,5 мин; конец схватывания 20 мин;
- предел прочности при сжатии 6 МПа, при изгибе 7 МПа.



Рис. 1. Фосфогипс

В качестве минеральных добавок в исследуемых композициях использовались синтетический этtringит, известь гашеная. Пластифицирующей добавкой являлся гиперпластификатор РС1021 (рис. 2), произведенный в Китае.



Рис. 2. Гиперпластификатор РС1021

Исследуемые составы композиционного гипсового вяжущего оценивались по результатам испытаний образцов-балочек с размерами 40x40x160 мм (рис. 3), изготовленных литьевым способом. Твердение образцов осуществлялось в воздушно-сухих условиях при температуре $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ в течение 7 сут. Испытания физико-механических свойств – пределов прочности при сжатии и изгибе – проводились согласно

требованиям ГОСТ 23789-2018. Содержание компонентов составов 1 и 2 представлено в таблице.



Рис. 3. Образцы-балочки на основе фосфогипсовых смесей

Состав фосфогипсовых смесей

Номер состава	Содержание компонентов				
	Г-16	Фосфогипс	Синтетический этtringит	Известь	РС1021
1	+	+	+	+	+
2	+	+	–	–	+

По результатам проведенных испытаний были получены следующие физико-механические характеристики фосфогипсового камня: предел прочности при сжатии, предел прочности при изгибе, средняя плотность (рис. 4, 5).

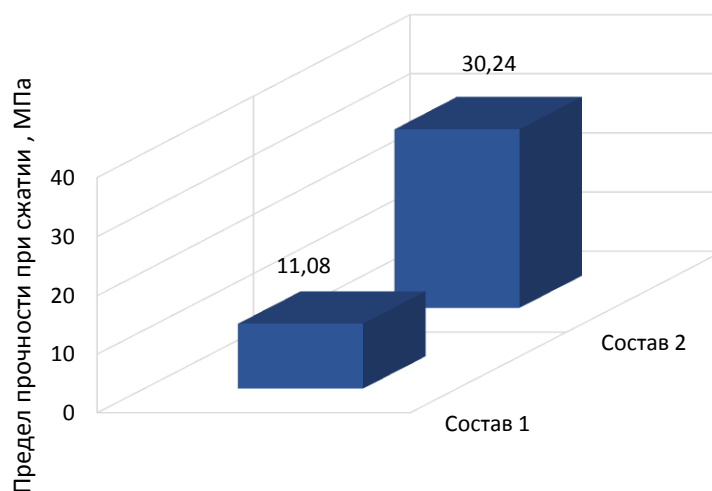


Рис. 4. Сравнительные данные по прочности при сжатии фосфогипсового камня

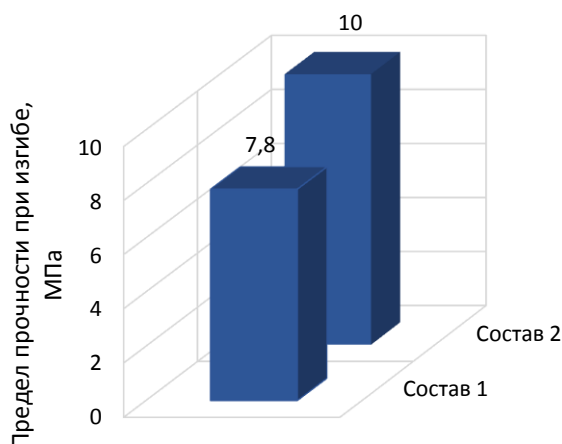


Рис. 5. Сравнительные данные по прочности при изгибе фосфогипсового камня

Сравнительный анализ данных показал, что наилучшими прочностными характеристиками обладает состав 2 (предел прочности на сжатие 30,24 МПа, при изгибе 10 МПа), в то время как у состава 1 предел прочности на сжатие 11,08 МПа, что в 2,72 раза меньше, чем у состава 1, а при изгибе 7,8 МПа, что в 1,28 меньше, чем у состава 1. Снижение прочности при сжатии и изгибе для состава 1 обусловлено, по-видимому, негативным комплексным воздействием многокомпонентного модифицирующего комплекса из добавок. Положительное воздействие извести на структуру твердеющего фосфогипса, известное из литературных источников, вероятно, нивелировалось присутствием синтетического этtringита.

Исследования средней плотности фосфогипсового камня продемонстрировали, что наименьшие в этой серии показатели средней плотности имеют образцы состава 1 ($1\,576,6\text{ кг/м}^3$), тогда как у состава 2 средняя плотность составляет $1\,879,11\text{ кг/м}^3$. Полученные данные по средней плотности фосфогипсового камня соотносятся с данными по прочности и не противоречат известным закономерностям.

Расчетные значения удельной прочности фосфогипсового камня показали, что для состава 1 значение этой прочности равно 7,08 МПа, а для второго состава – 16,09 МПа, что в 2,3 раза превысило этот показатель для состава 1.

Таким образом, благодаря проведенным исследованиям было установлено, что совместное введение добавок извести и синтетического этtringита отрицательно сказывается на свойствах фосфогипсового камня. Возможно, это обусловлено негативным результатом взаимодействия извести и высокоосновных гидросульфаталюминатов кальция в твердеющей композиции на основе дигидрата, что приводит к некоторой деструкции гипсового камня. Пластифицирующая добавка способствовала снижению водопотребности сырьевых смесей. Однако выявление оптимального процентного содержания пластификатора и воздействие этtringита требует дальнейшего изучения. Установление закономерностей изменения физико-механических и структурных характеристик фосфогипсового камня при введении минеральных модификаторов необходимо сочетать с использованием данных физико-химического анализа.

Полученные составы с разным содержанием модифицирующих добавок могут быть использованы при создании целого ряда листовых строительных материалов и конструкций, например аквапанели. Утилизация фосфогипсовых отходов в качестве замены основной части гипсового вяжущего в производстве строительной продукции повышает ее экономическую эффективность.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang Q., Cui Y., Xue J.F. Study on the improvement of the waterproof and mechanical properties of hemihydrate phosphogypsum based foam insulation materials // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 230. Pp. 1–12.
2. Yelizaveta C., Elena Y., Viktoriia C., Hyne R. Phosphogypsum recycling: a review of environmental issues, current trends, and prospects // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Pp. 1575.
3. Cui Y., Wang Q., Xue J.F. Novel foam insulation material produced by calcined phosphogypsum and H₂O₂ // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020. Vol. 32. No. 12.
4. Yang L., Zhang Y., Yan Y. Utilization of original Phosphogypsum as raw material for the preparation of selfleveling mortar // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 127. Pp. 204–213.
5. Yang L., Cao J., Li C. Enhancing the hydration reactivity of hemi-hydrate Phosphogypsum through a morphologycontrolled preparation technology // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2016. Vol. 24. No. 9. Pp. 1298–1305.
6. Huang Y., Qian J., Kang X. et al. Belite-calcium sulfoaluminate cement prepared with phosphogypsum: influence of P₂O₅ and F on the clinker formation and cement performances // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 203. Pp. 432–442.
7. Singh M. Role of phosphogypsum impurities on strength and microstructure of selenite plaster // *Construction and Building Materials*. 2005. Vol. 19. No. 6. Pp. 480–486.
8. He S.Y., Shi Y., Li Q.Y. Effect of particle gradation on properties of phosphogypsum-based cement paste backfill. *Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Energy and Environment Protection*. Mongolia, China, November 2017.
9. Liu L.Z., Chen D.Y., Liu Y.H. Study on the pretreatment technology and preparing construction gypsum of phosphogypsum // *Non-Met Allc Mines*. 2014. Vol. 3. Pp. 30–32.
10. Wang J., Dong F., Wang Z. A novel method for purification of phosphogypsum // *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2020. Vol. 56. No. 5. Pp. 975–983.
11. Al-Hwaiti M.S. Assessment of the radiological impacts of treated phosphogypsum used as the main constituent of building materials in Jordan // *Environmental Earth Sciences*. 2015. Vol. 74. No. 54. Pp. 1–11.
12. Zhang L.C., Zhang A.L., Li K., Wang Q. Research on the pretreatment and mechanical performance of undisturbed phosphogypsum // *Case Studies in Construction Materials*. 2020. Vol. 13.
13. Xiong C.Y., Li S.Z., Niu Y.H. Preparation of building gypsum from phosphogypsum in sichuan and its properties // *Non-Met Allc Mines*. 2020. Vol. 43. No. 3. Pp. 33–36.
14. Qudoos A., Kakar E., Rehman A., Jeon I.K. Influence of milling techniques on the performance of wheat straw ash in cement composites // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10.

15. Lemougna P.N., Yliniemi J., Nguyen H. Utilization of glass wool waste and mine tailings in high performance building ceramics // *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 31. Pp. 101383.
16. Ravaszov'a S., Dvo'r'ak K., Gazdi'c D. Impact of the grinding process on the granulometric properties of dicalcium silicate // *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 296. Pp. 57–63.
17. Peuker U.A. Synthesis of high performance geopolymers by wet milling of blast furnace slags // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 959. Pp. 177–182.
18. Li X., Wang Y., Wan H.W., Wang P.Q. Experimental study on the gypsum preparation by the phosphogypsum // *Journal of Wuhan University of Technology*. 2015. Vol. 37. No. 12. Pp. 40–46.
19. Xiong C.Y. Study on preparation and performance of building gypsum by phosphogypsum microwave method, southwest university of science and technology. China: Mianyang, 2020.
20. Yan N.R. Processes and effects of mechanochemistry (I) // *Journal of Building Materials*. 2000. Vol. 3. No. 1. Pp. 19–26.
21. Yan N.R. Processes and effects of mechanochemistry (II) // *Journal of Building Materials*. 2000. Vol. 3. No. 2. Pp. 93–97.
22. Петропавловская В.Б., Бурьянов А.Ф., Новиченкова Т.Б., Петропавловский К.С. Самоармированные гипсовые композиты. М.: Де Нова, 2015. 163 с.
23. Zhang J., Wang X., Jin B., Liu C., Zhang X., Li Z. Effect of soluble P₂O₅ form on the hydration and hardening of hemihydrate phosphogypsum // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022. Vol. 2022.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БАБАЕВ Даниил Дмитриевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: dr.d1708@yandex.ru

ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ Кирилл Сергеевич – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

ДАНЯКИН Вадим Александрович – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ Виктория Борисовна – доктор технических наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: victoriapetrov@gmail.com

НОВИЧЕНКОВА Татьяна Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tanovi.69@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Бабаев Д.Д., Петропавловский К.С., Данякин В.А., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б. Утилизация фосфогипса в производстве строительных изделий // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 1 (17). С. 5–13.

**UTILIZATION OF PHOSPHOGYPSUM IN THE MANUFACTURE
OF BUILDING PRODUCTS**

**D.D. Babaev, K.S. Petropavlovskii, V.A. Danyakin, V.B. Petropavlovskaya,
T.B. Novichenkova**
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. In the article we considered the possibility of using industrial waste from the chemical industry – phosphogypsum – as part of raw mixtures with a complex of modifying additives. These additives were introduced in order to improve the physical, mechanical and operational characteristics of the composite binder based on phosphogypsum. It has been established that the introduction of mineral additives affects the properties of phosphogypsum stone – strength and average density. The strength of the hardened stone increases if a rationally selected composition of the raw material mixture with a plasticizing additive is used. It helps to reduce the water demand of the composite binder and increase its strength.

Keywords: phosphogypsum, gypsum binder, modifier, hyperplasticizer, strength. water demand.

REFERENCES

1. Wang Q., Cui Y., Xue J.F. Study on the improvement of the waterproof and mechanical properties of hemihydrate phosphogypsum based foam insulation materials. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 230, pp. 1–12.
2. Yelizaveta C., Elena Y., Viktoriia C., Hyne R. Phosphogypsum recycling: a review of environmental issues, current trends, and prospects. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, pp. 1575.
3. Cui Y., Wang Q., Xue J.F. Novel foam insulation material produced by calcined phosphogypsum and H₂O₂. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020. Vol. 32. No. 12.
4. Yang L., Zhang Y., Yan Y. Utilization of original Phosphogypsum as raw material for the preparation of selfleveling mortar. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 127, pp. 204–213.
5. Yang L., Cao J., Li C. Enhancing the hydration reactivity of hemi-hydrate Phosphogypsum through a morphologycontrolled preparation technology. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2016. Vol. 24. No. 9, pp. 1298–1305.
6. Huang Y., Qian J., Kang X. et al. Belite-calcium sulfoaluminate cement prepared with phosphogypsum: influence of P₂O₅ and F on the clinker formation and cement performances. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 203, pp. 432–442.
7. Singh M. Role of phosphogypsum impurities on strength and microstructure of selenite plaster. *Construction and Building Materials*. 2005. Vol. 19. No. 6, pp. 480–486.
8. He S.Y., Shi Y., Li Q.Y. Effect of particle gradation on properties of phosphogypsum-based cement paste backfill. *Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Energy and Environment Protection*. Mongolia, China, November 2017.
9. Liu L.Z., Chen D.Y., Liu Y.H. Study on the pretreatment technology and preparing construction gypsum of phosphogypsum. *Non-Met Alluvial Mines*. 2014. Vol. 3, pp. 30–32.
10. Wang J., Dong F., Wang Z. A novel method for purification of phosphogypsum. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2020. Vol. 56. No. 5, pp. 975–983.
11. Al-Hwaiti M.S. Assessment of the radiological impacts of treated phosphogypsum used as the main constituent of building materials in Jordan. *Environmental Earth Sciences*. 2015. Vol. 74. No. 54, pp. 1–11.

12. Zhang L.C., Zhang A.L., Li K., Wang Q. Research on the pretreatment and mechanical performance of undisturbed phosphogypsum. *Case Studies in Construction Materials*. 2020. Vol. 13.
13. Xiong C.Y., Lv S.Z., Niu Y.H. Preparation of building gypsum from phosphogypsum in sichuan and its properties. *Non-Met Allie Mines*. 2020. Vol. 43. No. 3, pp. 33–36.
14. Qudoos A., Kakar E., Rehman A., Jeon I.K. Influence of milling techniques on the performance of wheat straw ash in cement composites. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10.
15. Lemougna P.N., Yliniemi J., Nguyen H. Utilization of glass wool waste and mine tailings in high performance building ceramics. *Journal of Building Engineering*. 2020. Vol. 31, pp. 101383.
16. Ravaszov'a S., Dvo'r'ak K., Gazdi'c D. Impact of the grinding process on the granulometric properties of dicalcium silicate. *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 296, pp. 57–63.
17. Peuker U.A. Synthesis of high performance geopolymers by wet milling of blast furnace slags. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 959, pp. 177–182.
18. Li X., Wang Y., Wan H.W., Wang P.Q. Experimental study on the gypsum preparation by the phosphogypsum. *Journal of Wuhan University of Technology*. 2015. Vol. 37. No. 12, pp. 40–46.
19. Xiong C.Y. Study on preparation and performance of building gypsum by phosphogypsum microwave method. China: Mianyang, 2020.
20. Yan N.R. Processes and effects of mechanochemistry (I). *Journal of Building Materials*. 2000. Vol. 3. No. 1, pp. 19–26.
21. Yan N.R. Processes and effects of mechanochemistry (II). *Journal of Building Materials*. 2000. Vol. 3. No. 2, pp. 93–97.
22. Petropavlovskaya V.B., Buryanov A.F., Novichenkova T.B., Petropavlovskii K.S. Samoarmirovannye gipsovye kompozity [Self-reinforced gypsum composites]. M.: De Nova, 2015. 163 p.
23. Zhang J., Wang X., Jin B., Liu C., Zhang X., Li Z. Effect of soluble P₂O₅ form on the hydration and hardening of hemihydrate phosphogypsum. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022. Vol. 2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BABAEV Daniil Dmitrievich – master's student, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: dr.d1708@yandex.ru

PETROPAVLOVSKII Kirill Sergeevich – candidate of technical sciences, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

DANYAKIN Vadim Aleksandrovich – graduate student, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

PETROPAVLOVSKAYA Viktoriya Borisovna – doctor of technical sciences, professor of the department of building materials and structures, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

NOVICHENKOVA Tatiana Borisovna – candidate of technical sciences, associate professor of the department of production of building products and structures, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tanovi.69@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Babaev D.D., Petropavlovskii K.S., Danyakin V.A., Petropavlovskaya V.B., Novichenkova T.B. Utilization of phosphogypsum in the manufacture of building products // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 1 (17), pp. 5–13.

УДК 691.11

**БИОКОМПОЗИТЫ СТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБОТКИ
ЧАСТЬ 1 (ОБЗОР)*****В.В. Белов****Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., 2023

Аннотация. Изучены способы применения отходов деревообработки, перспективы их использования в качестве заполнителя для легких бетонов и других строительных материалов. Рассмотрены возможные технологии получения строительных материалов на основе химически и механически активированного древесного заполнителя. Показано, что многие из этих технологий достаточно сложны и не позволяют получить материалы с высокими строительно-техническими свойствами. Сделан вывод, что если будут найдены нетрадиционные способы активации древесного заполнителя, в том числе за счет использования приемов биотехнологии, указанные отходы, плотность которых значительно ниже плотности традиционных заполнителей, смогут служить отличным сырьем для производства легкого бетона и способствовать уменьшению затрат на добычу природных ресурсов и энергии для их переработки.

Ключевые слова: отходы деревообработки, опилкобетон, древесный заполнитель, свойства, технология.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-14-26**ВВЕДЕНИЕ**

Основными направлениями экономического развития России предусмотрена программа развития топливно-энергетического комплекса и экономии энергоресурсов. В частности, планируется переход на энергосберегающие технологии производств, сокращение всех видов энергетических потерь и повышение уровня использования вторичных энергоресурсов (ВЭР) [1]. Применению ВЭР в последние годы уделяется значительное внимание. Вместе с тем вопросы рационального использования ВЭР освещены недостаточно [2].

Можно выделить новую, перспективную и развивающуюся технологию утилизации важнейших ВЭР, к которым относятся промышленные отходы и которые более правильно называть вторичными техногенными ресурсами, – депонирование. Этот метод представляет собой добавление строительных отходов в структуру новых материалов, при этом получают совершенно новые их модификации с улучшенными характеристиками. Депонирование является методом, основывающимся на методе рециклинга с использованием уже отсортированного или переработанного сырья [1].

При исследовании вопроса получения строительных материалов на основе промышленных отходов нельзя не обратить внимание на их технико-экономическую эффективность и безопасность для человека и окружающей среды. Натуральное дерево, камень, солома, глина, песок и другие природные материалы и полезные ископаемые,

непосредственно используемые для строительства, экологически безопасны, но приводят к изъятию природных ресурсов из природной среды, истощая ее запасы.

Применение в строительстве и отделке дома экологически безвредных строительных материалов на основе промышленных отходов, не оказывающих прямого или косвенного воздействия на здоровье человека и на природную среду, является важнейшим фактором обеспечения экологической безопасности зданий и сооружений, а также технико-экономической эффективности строительства в целом. Предпочтительно использование местных сырья и промышленных отходов (целлюлозы, войлока, стружки, опилок, хлопка, пробки, базальта), изготовление материалов – цементно-стружечных, фибролитовых и базальтовых плит, блоков, панелей, стекломгнезиевого листа и других конструкционных и изоляционных материалов, – по доступной технологии, в том числе непосредственно на строительной площадке, с учетом необходимых экологических и санитарных требований [3].

В целом использование промышленных отходов позволяет покрыть до 40 % потребности строительства в сырьевых ресурсах. Применение промышленных отходов позволяет на 10–30 % снизить затраты на изготовление строительных материалов по сравнению с производством их из природного сырья, создавать новые строительные материалы с высокими технико-экономическими показателями и, кроме того, уменьшить загрязнение окружающей среды. В то же время их грамотное применение требует реализации системы управления обращения с отходами с помощью методов экономико-математического моделирования, позволяющих оптимизировать потоки обрабатываемых отходов. При выполнении указанных условий вторичное сырье, материалы, которые перерабатываются или повторно используются, дадут возможность бюджетам различных уровней получить доход, а бизнесу – дополнительную прибыль [4, 5].

Одними из многотоннажных техногенных отходов являются отходы деревообработки, которые представляют собой трудно утилизируемый материал, практически не используемый повторно. В лучшем случае он сжигается, что также требует специальной технологии (в частности, изготовления древесных гранул – пеллет). Следовательно, в силу того, что ресурсная база отходов деревообработки весьма значительна, их применение для производства строительных материалов, в том числе в качестве заполнителей легких бетонов, представляется достаточно привлекательным. Потенциальными потребителями данных отходов могут быть предприятия по выпуску строительных материалов, изделий и конструкций.

ХИМИЧЕСКАЯ АГРЕССИВНОСТЬ ЗАПОЛНИТЕЛЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ПО ОТНОШЕНИЮ К ЦЕМЕНТУ И МЕРЫ ПО ЕЕ СНИЖЕНИЮ

В практике малоэтажного строительства все большее применение находят цементно-древесные композиции для изготовления стеновых материалов. По причине развития технологии устройства монолитных, а также каркасно-монолитных стен, изготовленных на базе цементно-древесных композиционных материалов, необходимо установить закономерности взаимодействия древесного заполнителя (каркаса) с цементным тестом при обычной температуре. При управлении качеством материалов возникают сложности, связанные с химической агрессивностью древесного заполнителя и его подверженностью значительным влажностным деформациям, что существенным образом сказывается на прочности контакта заполнителя с минеральным вяжущим.

Из всех специфических особенностей целлюлозосодержащих наполнителей наиболее хорошо изучена их агрессивность по отношению к клинкерному цементу. Исследование свойств композиции «древесина – цементный камень» началось с 1924 г. Было выдвинуто предположение, что низкая прочность этой композиции связана с химическим составом древесины (табл. 1) [6].

Таблица 1

Химический состав некоторых пород древесины [6]

Составные части, %	Ель	Сосна	Осина	Бук
Целлюлоза (определяется по хлорному методу без пентозанов)	58,3	55,6	54,1	47,9
Лигнин (определяется по сернокислому методу)	28,3	26,5	20,1	22,5
Гемицеллюлоза (легкогидролизуемые пентозаны)	10,3	9,6	22,4	26,0
Экстрактивные вещества, растворимые в горячей воде	1,9	2,3	2,3	2,4

Древесина представляет собой сложный комплекс веществ (главным образом органического происхождения). Она состоит из целлюлозы (примерно 50 % всей массы древесины), лигнина, гемицеллюлозы и небольшого количества экстрактивных веществ – таннидов (дубильных и красящих веществ), жиров, эфирных масел, органических кислот, водорастворимых сахаров, минеральных солей [6].

Лигнин древесины почти нерастворим в известных растворителях, не гидролизует кислотами до мономерных единиц, очень чувствителен даже к мягким обработкам и поэтому значительно изменяется при выделении. Все это является препятствием для его изучения [7]. Целлюлоза и лигнин, составляющие основную массу клеточных оболочек растений и определяющие их механическую прочность, являясь достаточно стойкими веществами, вредного влияния на процесс твердения клинкерных цементов не оказывают.

Гемицеллюлозная часть древесины представляет собой сложные органические вещества (полисахариды), способные в щелочной среде (которой является цементный раствор, покрывающий древесный наполнитель) гидролизироваться и переходить в водорастворимые сахара. Водорастворимые сахара – сильнейшие «цементные яды» [6].

К экстрактивным относятся вещества, извлекаемые из древесины нейтральными растворителями (органическими или водой). Они содержатся главным образом в полостях клеток и межклеточных пространствах, а также могут пропитывать клеточные стенки. Содержание экстрактивных веществ в древесине значительно колеблется (от 1 до 40 % и более) и зависит в основном от породы, возраста, условий произрастания дерева и т.д. В обычных отечественных древесных породах содержание экстрактивных веществ невелико (в среднем 2–4 %). Исключением является дуб, древесина которого содержит значительное количество дубильных веществ. Экстрактивные вещества – танниды – имеют большие размеры молекул (порядка 100 мкм). Указанные вещества вымываются из древесины только горячей водой или горячим раствором «минерализатора» и хорошо осаждаются. Вследствие этого танниды не оказывают существенного влияния на процесс твердения цемента [6].

Смолистые вещества, содержащиеся в древесине, также воздействуют на процесс твердения цемента. Смоляные кислоты $C_{19}H_{29}COOH$, выделяющиеся из древесного наполнителя, при взаимодействии со щелочами, которые находятся в цементном тесте,

образуют мыльные растворы. При значительном содержании смолистых веществ в древесине прочность древесно-цементной композиции может несколько снизиться вследствие уменьшения смачиваемости частиц древесины и ухудшения сцепления с цементным тестом (камнем) [6].

Первые исследования показали, что легкогидролизуемые и экстрактивные вещества – цементные «яды», которые содержит древесина, – вредны для цемента, так как замедляют набор прочности изделия. Поэтому все усилия исследователей и практиков были направлены на нейтрализацию такого вредного явления. Позднее в работах, проведенных отечественными и зарубежными исследователями, было установлено, что наиболее вредное воздействие оказывают легкорастворимые простейшие сахара: сахароза, глюкоза, фруктоза и часть гемицеллюлозы, способной в определенных условиях перейти в форму таких сахаров, и в меньшей степени опасны крахмал, таниды и смолы. Щелочная среда цементного теста способствует выделению цементных «ядов», количество которых изменяется в значительных пределах в зависимости от породы древесины, условий и сроков ее хранения.

Выявлено, что воздействие водорастворимых веществ древесины на твердеющий цемент проявляется в стабилизирующем эффекте, аналогичном действию поверхностно-активных веществ. Цементные «яды», состоящие в основном из углеводных групп НОСН, осаждаясь на поверхности частичек минералов цемента 3CaOSiO_2 (трехкальциевый силикат) и $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ (трехкальциевый алюминат), образуют тончайшие оболочки, которые изолируют частицы цемента от воды, замедляют ход процессов гидролиза и гидратации цемента.

Для уменьшения отрицательного влияния водорастворимых экстрактивных и легкогидролизуемых веществ на прочность древесно-цементной композиции были предложены различные способы и технологические приемы, сущность которых заключалась в частичном удалении этих веществ из древесного заполнителя, в переводе простейших сахаров в нерастворимые или безвредные для цементного вяжущего соединения, в ускорении твердения портландцемента (т.е. в сокращении времени воздействия сахаров на процессы твердения). В большинстве своем предложенные способы «минерализации» древесного заполнителя предусматривают достаточно сложные технологические процессы, требующие многоступенчатой обработки заполнителя различными химикатами с последующим кипячением или промывкой, выдержки в силосах для стабилизации его свойств или сушки и др. [6].

Проведены исследования некоторых зависимостей физико-механических свойств арболита от вида применяемого сырья, его зернового состава, минерализатора, сроков распалубочной и отпускной прочности и т.д. При работе с различными древесными заполнителями выяснилось, что наилучшими прочностными показателями обладает арболит с заполнителем из хвойных пород, затем береза и осина [8].

В условиях производства иногда возникает необходимость выпускать арболит из невыдержанной древесины, заготовленной в зимний период, когда запас выдержанной древесины истощается. В этом случае необходимо применять химические добавки, которые нейтрализуют действие вредных для цемента водорастворимых веществ, находящихся в древесине. Применяли хлористый кальций, жидкое стекло, серноокислый алюминий и их сочетание. При работе на невыдержанной древесине введение в дробленку общепринятого минерализатора – хлористого кальция – в количестве 2 % от веса цемента не обеспечивает проектную марку арболита. В результате многократных испытаний

проектная марка была получена с применением комплексной добавки – жидкого стекла плюс сернокислый алюминий, соответственно 20 и 13 кг на 1 м³ арболита. Однако следует отметить, что использование в качестве минерализатора сернокислого алюминия вызывает удорожание продукции [8].

Из многочисленных добавок, опробованных в отечественной и зарубежной практике, приняты такие, при которых «минерализаторами» служат хлористый кальций и жидкое стекло. Однако при том, что применяемые способы «минерализации» древесного заполнителя повышают скорость нарастания прочности в начальный период, все же, как видно из табл. 2, они не позволяют получать достаточно прочный материал. Проведенные исследования показали, что при почти полном удалении легкогидролизуемых веществ из древесного заполнителя прочность арболита удается увеличить на 10–15 %. Следовательно, наличие таких веществ в заполнителе можно рассматривать лишь как один из его недостатков [6].

Таблица 2

Прочность и расход компонентов композиции
«древесина – цементный камень» [6]

Материал	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность, МПа		Расход компонентов, кг на 1 м ³ арболита			
		при изгибе	при сжатии	Древесный заполнитель	Цемент	Химическая добавка	Вода
Арболит М 10...35	500–800	0,5–0,95	1,0–3,5	180–240	280–400	8	300–400
Дюризол	600–700	0,9–1,2	1,5–3,5	200–230	325–350	37	70–100
Велокс	550–600	1,2–2,2	–	366–414	200	16	150
Пилино бетон	700	1,45	1,97	166	411	16,5	284

Установлено, что сцепление древесины с цементным раствором и бетоном зависит от В/Ц смеси, условий хранения конструкций, влажности, шероховатости и формы деревянных стержней (брусков). В зависимости от принятых условий величина сцепления колебалась от 0,05 до 1,25 МПа [6].

В работе М.М. Сычева [9] предприняты попытки выяснить возможности активации формирования и упрочнения адгезионных контактов и наметить пути повышения адгезии цементов. Установлено, что образование адгезионных контактов химической природы между наполнителем-связующим и цементирующей фазой связано с кислотными или основными свойствами наполнителя, влияющими на величину рН в контактной зоне и кислотно-основное взаимодействие между наполнителями и цементирующей фазой. Силу поверхностных центров, участвующих в адгезии (кислотных, основных, электронодонорных или электроноакцепторных, протондонорных или протонакцепторных), можно регулировать путем адсорбционного легирования, ионным обменом, ионсорбцией или адсорбцией специфических молекул, управляя тем самым химическими и электрическими свойствами поверхности заполнителя и армирующего материала.

Полимеризационные явления в пленочных гелях на границе раздела фаз «наполнитель – связующее» определяются величиной рН. Это также подчеркивает перспективность обработки заполнителя (в зависимости от его кислотно-основных свойств) кислотами и щелочами. Следовательно, используя обработку кислотами, щелочами или ионсорбцию, можно искусственно повысить концентрацию центров, участвующих в адгезии, или усилить адгезионные свойства уже имеющихся центров [9].

В исследованиях А.И. Кудякова, Л.Н. Пименовой и В.В. Кривды [10] выявлялись закономерности формирования адгезионного контакта древесины с цементным тестом в ранние сроки, т.е. до начала его схватывания, поскольку образование первичных структур во многом обуславливает «работоспособность» контакта в процессе эксплуатации композиционного материала. Объектами исследования служили единичные образцы-пластины 40x40x10 мм, изготовленные из выдержанной в комнатных условиях древесины хвойных пород (сосны, ели и лиственницы) распиловкой в поперечном и тангенциальном направлениях с последующим шлифованием. Цементное тесто (В/Ц = 0,4) готовили из портландцемента М400 Топкинского завода и водопроводной воды. Величину адгезии цементного теста к срезу древесины определяли по усилию отрыва образца от поверхности теста. Усилие отрыва измеряли с помощью установки, смонтированной на базе весов ВЛА-200.

При установлении закономерностей формирования адгезионного контакта использовались различные способы предварительной обработки древесных образцов: высушивание до постоянной массы, выдерживание в воде до достижения предела гигроскопической влажности, в насыщенном растворе гидроксида кальция, в растворах хлорида кальция и сульфата алюминия. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что процесс формирования контакта древесного заполнителя с цементным тестом осуществляется в более сложных условиях, чем в цементных бетонах на плотных заполнителях, и может быть представлен в виде системы взаимосвязанных и обусловленных явлений, приводящих к конструктивным и деструктивным последствиям. Большое значение в формировании контактной зоны имеют химические процессы. К ним относятся адсорбция ионов Ca^{2+} гидратированного цемента на гидроксильных группах целлюлозы и лигнина (процесс, способствующий упрочнению адгезионного контакта), а также экстракция из древесины цементных «ядов» – водорастворимых соединений и их адсорбция на поверхности клинкерных минералов, приводящая к замедлению гидратации и препятствующая схватыванию и твердению цемента (процесс, снижающий адгезионную прочность контакта). Для оценки роли химических процессов в формировании адгезионного контакта производили предварительную обработку образцов древесины насыщенным раствором гидроксида кальция и двухпроцентными растворами минерализаторов [10].

Предварительная выдержка образцов древесины в насыщенном растворе гидроксида кальция изменяет картину формирования адгезионного контакта. Такая подготовка приводит прежде всего к блокировке активных центров (ОН-групп) древесины за счет преадсорбции ионов Ca^{2+} , вовлекаемых в глубь образца вместе с диффундирующей водой. Следует отметить, что максимальна концентрация этих активных центров у сосны как породы, наиболее богатой целлюлозой – основным носителем ОН-групп, а минимальная – у лиственницы (табл. 3). Кроме того, гидроксид кальция нейтрализует кислые цементные «яды», наибольшее содержание которых характерно для лиственницы, а наименьшее – для ели. Таким образом, происходит нивелирование хода кинетических

кривых: существенное повышение прочности контакта для лиственницы и некоторое ее снижение в поздние сроки для ели при переходе от предварительной выдержки в воде к выдержке в насыщенном растворе гидроксида кальция. По всей вероятности, подавляются негативные явления, связанные с химическим взаимодействием древесного заполнителя с цементным тестом, и увеличивается положительный эффект за счет диффузии воды и цементных частиц, что приводит к заметному росту начальной адгезионной прочности контакта [5].

Таблица 3

Результаты физико-химических исследований взаимодействия древесины с растворами минерализаторов [5]

Вид породы	Средняя плотность, кг/м ³	Примерный состав, %				рН водн. вытяжки древесины	рН растворов минерализаторов после контакта с древесиной в течение 1 ч		
		Целлюлоза	Лигнин	Водораств. вещества	Жир, воск, смола		Ca(OH) ₂	CaCl ₂	Al(SO ₄) ₃
Сосна	507	50,6	27,5	2,3	3,4	5,7	12,6	6,2	3,7
Ель	476	45,2	28,1	1,9	2,5	6,6	12,6	7,2	3,8
Лиственница	765	36,2	28,6	20,0	1,4	5,2	12,6	5,4	3,7

Предварительная выдержка образцов в растворе хлорида кальция аналогичным образом приводит к блокировке ОН-групп активных центров адсорбции, однако не вызывает нейтрализации кислых цементных «ядов». Последнее подтверждается и результатами потенциометрических измерений рН водных вытяжек (см. табл. 3).

Адгезия цементного камня к лиственнице, обработанной раствором CaCl₂, через 15 мин ниже, чем при обработке раствором Ca(OH)₂. Наиболее благотворной такая обработка оказалась для древесины сосны. Хороший эффект получен при обработке лиственницы раствором сульфата алюминия, который, гидролизуясь в воде, образует коллоиды гидроксида алюминия, служащие центрами коагуляции цементных «ядов». Комбинированная обработка путем выдержки древесины последовательно в растворах сульфата алюминия и хлорида кальция, приводящая к кольматации пор древесины продуктом их взаимодействия – гипсом, а в дальнейшем при контакте с цементным тестом – этtringитоподобными соединениями, оказывается малоэффективной по сравнению с выдержкой в воде [10].

Таким образом, полученные результаты позволяют утверждать, что наиболее целесообразной для рассмотренных случаев является химическая подготовка древесного заполнителя путем его выдержки в известковой воде, когда одновременно достигается преадсорбция ионов кальция на волокнах древесины и нейтрализация водорастворимых цементных «ядов».

В целом, как показывают приведенные выше данные, технологии получения древесных композиционных материалов на основе химически и механически

активированного древесного заполнителя достаточно сложны и не позволяют получить теплоизоляционные материалы с высокими строительно-техническими свойствами.

ПРИНЦИПЫ ПОЛУЧЕНИЯ БИОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

В последние годы в технологии строительных материалов все шире начинают использоваться принципы работы биосистем с целью разработки строительных биотехнологий и биокomпозитов. Это основано, в частности, на определенных аналогиях в работе, восприятии внешних нагрузок и внутреннем строении объектов живой и неживой природы [11, 12]. Задачами, решаемыми методами биотехнологии в настоящее время, являются создание модификаторов бетонной смеси на основе продуктов микробного синтеза [13], эффективных экологически чистых пенообразователей для ячеистых бетонов на основе местного сырья биологического происхождения [14] и др.

К важнейшим задачам биотехнологии относится создание композиционных материалов строительного назначения на основе древесного и другого растительного сырья. Пьезометрическая обработка или тонкое измельчение сырья с целью придания ему вяжущих свойств в производстве этого типа материалов требует больших энергозатрат. Альтернативой этому способу обработки сырья может быть биотехнологический процесс [15]. Таковы древесные биопластики, изготовленные без добавления токсичных синтетических связующих [16]. В основе их получения лежит направленное энзиматическое воздействие дереворазрушающих грибов на компоненты древесины.

Ферментный комплекс, продуцируемый микромицетами в процессе их жизнедеятельности, подвергает частичному разрушению составляющие древесных клеточных стенок (главным образом гемицеллюлозу и лигнин), высвобождая при этом реакционноспособные группы и активные центры природных полимеров, которые участвуют в образовании новых связей между частицами древесины в процессе формирования пластика. Такие дереворазрушающие грибы, как ксилотрофы, способны за 4–6 сут при температуре 20–29 °С произвести активизацию древесного и другого растительного сырья [17, 18].

В процессе образования пластиков из древесного сырья, подвергавшегося ферментации, вместе с гидролизованной полисахаридами и освобожденным лигнином участвуют и биополимеры, вырабатываемые микроорганизмами [19]. Древесные пластики из биологически активированного сырья получают горячим прессованием при давлении 2,5–3 МПа и температуре 180–200 °С. При плотности 900–1 000 кг/м³ биопластики имеют прочность при изгибе 16–20 МПа, разбухание 15–20 % и хорошие санитарно-гигиенические свойства. Таким образом, применение биологического процесса в производстве материалов без добавления вяжущих позволило избежать измельчения сырья, сократить продолжительность и давление прессования, улучшить физико-механические свойства материала [15, 17].

Совершенствование прочностных и эксплуатационных свойств биопластиков возможно за счет введения в состав сырьевой смеси в качестве «сшивающих» агентов непердельных кислот (в основном акриловой). Установлено, что инициирование привитой сополимеризации акриловой кислоты с лигнином древесины ведет к повышению прочности и водостойкости модифицированных древесных биокomпозитов на 15–20 %, не оказывая заметного влияния на их экологическую чистоту [16].

Биотехнологические принципы могут быть использованы и при получении древесно-цементных композиций. Эффективным способом предварительной обработки древесного заполнителя может стать процесс его биотрансформации с помощью микроорганизмов. В частности, из практики известно, что длительная выдержка (не менее 2 мес.) древесного сырья в окоренном виде ведет к уменьшению в древесине активных легкогидролизуемых веществ за счет биологических преобразований [20]. Задача современной биотехнологии – интенсификация этого процесса путем специальной обработки древесного заполнителя микроорганизмами, способными разрушать в растительном субстрате гемицеллюлозу, являющуюся связующим звеном между лигнином и целлюлозой. Применение этого способа удаления сахаров из органического заполнителя может повысить прочность древесно-цементных композиций в зависимости от продолжительности обработки в 1,5–3 раза [17, 18]. В качестве таких микроорганизмов предложено использовать некоторые лигнинразрушающие грибы [21]. Эти микроорганизмы, в частности высшие базидиальные грибы белой гнили (штамм *P.tigrinus-144*), способны синтезировать и выделять в окружающую среду комплекс активных целлюлозолитических ферментов, разрушающих боковые цепи гемицеллюлозы, что приводит к освобождению лигнина и появлению большого количества реакционноспособных группировок как в самом лигнине, так и в полисахаридах древесины. Все это положительно влияет на физико-механические свойства и скорость твердения биокомпозита [17, 18].

Важным вопросом при осуществлении биотехнологического процесса является экологическая чистота продукта биоферментации. В работе [21] отмечается, что поскольку грибы белой гнили относятся к съедобным, то строительные материалы, созданные с их помощью, не представляют никакой опасности для человека. Актуальной является и экономическая сторона процесса, а именно стоимость исходной биологической культуры, ее сохранения и воспроизводства. С этой точки зрения использование грибов из природной белой гнили может значительно усложнить технологию древесных композиционных материалов и существенно увеличить их стоимость.

В работе [22] исследован процесс твердофазной ферментации растительного сырья (торфа) микроорганизмами, содержащимися в субстрате животного происхождения – навозе. Биоферментация производилась при температуре 37 °С в течение 1–3 сут, после чего проводилась пастеризация в течение 2 сут при температуре 70–80 °С. В экспериментах зафиксированы высокая целлюлозолитическая активность микроорганизмов, участвующих в процессе ферментации, и наличие этой активности в полученных продуктах. При этом следует отметить, что вследствие пастеризации в продуктах целевого назначения не обнаружено вегетативных форм грибов и энтеробактерий, а общая численность живых микроорганизмов существенно снижена, что служит критерием экологической безопасности продуктов. Немаловажными обстоятельствами выступают также распространенность и сравнительно невысокая стоимость использованного в работе [21] источника ферментативной активности микробного происхождения – навоза.

ВЫВОДЫ

Таким образом, весьма перспективным направлением в разработке способов получения строительных материалов на основе местного растительного сырья (древесных отходов, торфа и др.) является использование микроорганизмов для обработки растительного заполнителя. Совершенствование технологии и улучшение физико-механических свойств материалов на основе древесно-цементных композиций без

энергоёмких процессов подготовки сырья и получения изделий возможно путем обработки древесного заполнителя ферментами микробного происхождения, что приводит к удалению из него нежелательных углеводов. К таким микроорганизмам принадлежат грибы белой гнили (штамм *P.tigrinus-144*), обладающие высокой гемицеллюлазной активностью. В то же время эта культура нуждается в специальных мерах по сохранению и воспроизводству, что усложняет технологию и повышает стоимость строительного материала.

Биоферментация древесного сырья с помощью микроорганизмов, содержащихся в недефицитном субстрате животного происхождения – навозе и обладающих мощным комплексом целлюлозолитических ферментов, приводит к быстрому разрушению как моно- и олиго-, так и полисахаридов типа гемицеллюлозы. Следовательно, данный субстрат может явиться источником микроорганизмов, которые способны к биоферментации древесного заполнителя, заключающейся в удалении из него нежелательных углеводов, т.е. «цементных ядов», что улучшит строительные свойства древесного композита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелевский Н.А. Эффективность переработки строительных отходов // *Международный журнал прикладных наук и технологий «Integral»*. 2020. № 3. С. 161–166.
2. Разуваев А.В., Кудашева И.О., Костин Д.А. Системы утилизации теплоты энергоустановок как способ энергосбережения // *Молодой ученый*. 2015. № 23.1 (103.1). С. 6–9.
3. Величко Е.Г., Цховребов Э.С. Экологическая безопасность строительных материалов: основные исторические этапы // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. Вып. 1 (100). С. 26–35.
4. Цховребов Э.С., Величко Е.Г. Научно-методологические подходы к созданию модели комплексной системы управления потоками строительных отходов // *Вестник МГСУ*. 2015. № 9. С. 95–110.
5. Петров В.В., Мурашкин В.Г. О необходимости создания единой базы данных перспективных инновационных исследований в строительной отрасли // *Эксперт: теория и практика*. 2021. № 1. С. 11–12.
6. Наназашвили И.Х. Строительные материалы из древесно-цементной промышленности. Л.: Стройиздат, 1990. 414 с.
7. Никитин В.М. Химия древесины и целлюлозы. М.: Лесная промышленность, 1978. 368 с.
8. Десятников М.А. Пути повышения качества и эффективности арболита // *На стройках России*. 1983. № 2. С. 11–16.
9. Сычев М.М. Адгезия цементов // *Цемент*. 1989. № 11. С. 22–27.
10. Кудяков А.И., Пименова Л.Н., Кривда В.В. О контактных взаимодействиях в цементно-древесных композициях на начальной стадии структурообразования // *Известия вузов. Строительство*. 1993. № 11–12. С. 65–70.
11. Шушпанов В.А. Принципы организации биоструктур в строительные материалы // *Современные проблемы строительного материаловедения: Материалы Международной научно-технической конференции: в 2 ч*. Пенза: ПГАСА, 1998. Ч. II. С. 79–81.
12. Андреев Е.И. Использование принципов работы биосистем в технологии строительных материалов // *Современные проблемы строительного материаловедения: Материалы Международной научно-технической конференции*. Казань, 1996. Ч. I. С. 25–27.

13. Соломатов В.И., Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Ревин В.В., Дудынов С.В. Модификаторы бетонной смеси на основе продуктов микробного синтеза // *Современные проблемы строительного материаловедения: Материалы Международной научно-технической конференции: в 2 ч.* Пенза: ПГАСА, 1998. Ч. I. С. 7–8.
14. Соломатов В.И., Черкасов В.Д., Бузулуков В.И., Киселев Е.В. Пенобетоны на биопене // *Современные проблемы строительного материаловедения: Материалы Международной научно-технической конференции: в 2 ч.* Пенза: ПГАСА, 1998. Ч. I. С. 154–157.
15. Соломатов В.И., Черкасов В.Д., Ерофеев В.Т. Строительные биотехнологии и биокомпозиты. М.: МИИТ, 1998. 165 с.
16. Лехина Е.П., Соломатов В.И., Черкасов В.Д. Пути повышения эксплуатационных свойств древесных бипластиков // *Современные проблемы строительного материаловедения: Материалы Международной научно-технической конференции: в 2 ч.* Пенза: ПГАСА, 1998. Ч. I. С. 40–41.
17. Соломатов В.И., Черкасов В.Д. Создание строительных биокомпозитов из древесного и другого растительного сырья. Сообщение 1. Теоретические предпосылки и принципы // *Известия вузов. Строительство.* 1997. № 1–2.
18. Соломатов В.И., Черкасов В.Д. Создание строительных биокомпозитов из древесного и другого растительного сырья. Сообщение 2. Биохимические процессы при разложении древесины лигнинразрушающими грибами и их влияние на свойства композитов // *Известия вузов. Строительство.* 1997. № 3 (459). С. 32–35.
19. Рипачек В. Биология дереворазрушающих грибов. М.: Лесная промышленность, 1967. 276 с.
20. Наназашвили И.Х. Арболит – эффективный строительный материал. М.: Стройиздат, 1984. 125 с.
21. Соломатов В.И., Черкасов В.Д., Ерофеев В.Т. Начало строительной биологии // *Промышленное и гражданское строительство.* 2000. № 3–4. С. 42–43.
22. Рабинович Г.Ю., Ковалев Н.Г., Сульман Э.М. Влияние биодобавок на развитие микроорганизмов-продуцентов метаболитов при экспрессной биоферментации // *Биотехнология.* 1999. № 5. С. 15–17.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В. Биокомпозиты строительного назначения с использованием отходов деревообработки. Часть 1 (обзор) // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 1 (17). С. 14–26.

**CONSTRUCTION BIOCOSCOMPOSITES USING
WOODWORKING WASTE. PART 1 (OVERVIEW)****V.V. Belov***Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The methods of using woodworking waste, the prospects for their use as aggregate for light concretes and other building materials have been studied. Possible technologies for production of construction materials based on chemically and mechanically activated wood aggregate are considered. It has been shown that many of these technologies are quite complex and do not allow obtaining materials with high construction and technical properties. At the same time, it is concluded that provided that unconventional methods of activating wood aggregate are found, including through the use of biotechnology techniques, these wastes, the density of which is significantly lower than the density of traditional aggregates, can serve as an excellent raw material for the production of light concrete and help reduce the cost of extracting natural resources and energy for their processing.

Keywords: woodworking wastes, sawdust concrete, wood aggregate, properties, technology.

REFERENCES

1. Khmelevsky N.A. Efficiency of processing of construction waste. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh nauk i tekhnologii «Integral»*. 2020. No. 3, pp. 161–166. (In Russian).
2. Razuvaev A.V. Kudasheva I.O., Kostin D.A. Heat recovery systems of power plants as a way of energy saving. *Molodoj uchenyj*. 2015. No. 23.1 (103.1), pp. 6–9. (In Russian).
3. Velichko E.G., Tskhovrebov E.S. Ecological safety of building materials: main historical stages. *Vestnik MGSU*. 2017. Vol. 12. Iss. 1 (100), pp. 26–35. (In Russian).
4. Tskhovrebov E.S., Velichko E.G. Scientific and methodological approaches to creating a model of an integrated system for managing construction waste flows. *Vestnik MGSU*. 2015. No. 9, pp. 95–110. (In Russian).
5. Petrov V.V., Murashkin V.G. On the need to create a unified database of promising innovative research in the construction industry. *Ekspert: teoriya i praktika*. 2021. No. 1, pp. 11–12. (In Russian).
6. Nanazashvili I.Kh. *Stroitel'nye materialy iz drevesno-cementnoj promyshlennosti* [Building materials from the wood-cement industry]. L.: Strojizdat, 1990. 414 p.
7. Nikitin V.M. *Himiya drevesiny i cellyulozy* [Chemistry of wood and cellulose]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1978. 368 p.
8. Desyatnikov M.A. Ways to improve the quality and efficiency of wood concrete. *Na strojках Rossii*. 1983. No. 2, pp. 11–16. (In Russian).
9. Sychev M.M. Adhesion of cements. *Cement*. 1989. No. 11, pp. 22–27. (In Russian).
10. Kudyakov A.I., Pimenova L.N., Krivda V.V. On contact interactions in cement-wood compositions at the initial stage of structure formation. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 1993. No. 11–12, pp. 65–70. (In Russian).
11. Shushpanov V.A. Principles of organizing biostructures in building materials. *Modern problems of building materials science: Materials of the International scientific and technical conference: in 2 p.* Penza: PGASA, 1998. P. II, pp. 79–81. (In Russian).

12. Andreev E.I. Using the principles of biosystems in the technology of building materials. *Modern problems of building materials science: Materials of the International scientific and technical conference: in 2 p.* Kazan, 1996. P. I, pp. 25–27. (In Russian).
13. Solomatov V.I., Cherkasov V.D., Buzulukov V.I., Revin V.V., Dudynov S.V. Concrete mix modifiers based on microbial synthesis products. *Modern problems of building materials science: Materials of the International scientific and technical conference: in 2 p.* Penza: PGASA, 1998. P. I, pp. 7–8. (In Russian).
14. Solomatov V.I., Cherkasov V.D., Buzulukov V.I., Kiselev E.V. Foam concrete on biofoam. . *Modern problems of building materials science: Materials of the International scientific and technical conference: in 2 p.* Penza: PGASA, P. I, pp. 154–157. (In Russian).
15. Solomatov V.I., Cherkasov V.D., Erofeev V.T. Stroitel'nye biotekhnologii i biokompozity [Building biotechnologies and biocomposites]. Moscow: MIIT, 1998. 165 p.
16. Lekhina E.P., Solomatov V.I., Cherkasov V.D. Ways to improve the performance properties of wood bioplastics. *Modern problems of building materials science: Materials of the International scientific and technical conference: in 2 p.* Penza: PGASA, P. I, pp. 40–41. (In Russian).
17. Solomatov V.I., Cherkasov V.D. Creation of building biocomposites from wood and other plant raw materials. Message 1. Theoretical background and principles. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo.* 1997. No. 1–2. (In Russian).
18. Solomatov V.I., Cherkasov V.D. Creation of building biocomposites from wood and other plant raw materials. Message 2. Biochemical processes during the decomposition of wood by lignin-destroying fungi and their influence on the properties of composites. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo.* 1997. No. 3 (459), pp. 32–35. (In Russian).
19. Ripachek V. Biologiya derevorazrushayushchih gribov [Biology of wood-destroying fungi]. Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1967. 276 p.
20. Nanazashvili I.Kh. Arbolit – effektivnyj stroitel'nyj material [Arbolite is an effective building material]. Moscow: Strojizdat, 1984. 125 p.
21. Solomatov V.I., Cherkasov V.D., Erofeev V.T. The Beginning of Building Biology. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo.* 2000. No. 3-4, pp. 42–43. (In Russian).
22. Rabinovich G.Yu., Kovalev N.G., Sulman E.M. Influence of bioadditives on the development of microorganisms-producers of metabolites during express biofermentation. *Biotekhnologiya.* 1999. No. 5, pp. 15–17. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

BELOV Vladimir Vladimirovich – adviser of the Russian academy of architecture and building sciences, doctor of technical sciences, professor, head of the department of building materials and structures, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V. Construction biocomposites using woodworking waste. Part 1 (overview) // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology».* 2023. No. 1 (17), pp. 14–26.

УДК 691.3

ВЛИЯНИЕ ТИПА АРМИРОВАНИЯ ГИПСОБЕТОНА НА ЕГО СВОЙСТВА

*П.А. Каляскин, В.Б. Петропавловская, Т.Р. Баркая,
К.С. Петропавловский, Т.Б. Новиченкова
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Каляскин П.А., Петропавловская В.Б., Баркая Т.Р.,
Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б., 2023

Аннотация. Статья является обзором способов армирования гипсобетонов. Современное строительство требует постоянного поиска новых эффективных, экологичных и низких по стоимости компонентов. Этим требованиям могут удовлетворять гипсовые материалы. В настоящее время они широко используются для внутренних отделочных работ, для производства ограждающих конструкций и декоративных элементов. Композитные гипсовые материалы являются одними из самых прогрессивных строительных компонентов, благодаря экономичности ввиду широкой распространенности гипса, экологичности, огнестойкости, простоте монтажа и низкой энергоемкости производства, но имеют ряд недостатков, таких как хрупкость и низкие показатели механических характеристик, что ограничивает их дальнейшее применение. Армирование гипсовых материалов значительно повышает прочностные характеристики, однако создание композитных материалов на основе гипса – одна из развивающихся и малоизученных областей в сфере производства материалов. Этот обзор служит основой для дальнейших исследований способов улучшения характеристик материалов на основе гипса с применением различного армирования для расширения сферы использования гипсовых изделий и строительных смесей на основе гипса.

Ключевые слова: гипсобетон, армирование, регулирование свойств.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-27-41

ВВЕДЕНИЕ

Бетон – это искусственный каменный материал, получаемый в результате формирования и твердения смеси вяжущего, крупного и мелкого заполнителя и воды. Бетон является одним из универсальных строительных и отделочных материалов, объем его потребления составляет на сегодняшний день порядка 10 млрд т в год [1], что требует использования 3 % всей вырабатываемой человечеством энергии и приводит к выбросу 8 % от всех парниковых газов [2]. Согласно [3] 90–95 % выбросов происходит при производстве цемента. В настоящий момент строительная индустрия нацелена на поиск энергоэффективных материалов, оказывающих минимальное отрицательное воздействие на окружающую среду [4]. При этом значительное влияние на стоимость бетона как наиболее популярного современного строительного материала оказывает рациональный выбор вяжущего вещества. Классическим и наиболее распространенным решением является использование альтернативного вяжущего, производство которого не наносит вред здоровью рабочих при производстве (сухим и мокрым методами [5]), а также не загрязняет окружающую среду выбросами хлор-, фторуглеводородов, углекислого и

сернистого газов, а воду и почву – твердыми бытовыми отходами [6]. Примером такого вяжущего может служить гипсовое вяжущее – один из самых древних строительных материалов [7, 8]. Его получают путем обработки двуводного гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, а также отходов промышленности. Гипсовые и ангидритовые вяжущие широко используются при производстве сухих строительных и закладочных смесей, гипсовых штукатурок и шпаклевок [8–10], в качестве затирочных смесей [10–12], а также для изготовления наливных полов и в качестве вяжущего вещества в различных композитах [13–16].

Сульфаты кальция в природе чаще всего представлены гипсом $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и ангидритом CaSO_4 , которые образуются в основном осадочным способом в эвапоритовых бассейнах аридного климата. На большой глубине погружения осадков сульфатов кальция в земной коре происходит преобразование гипса в ангидрит [17]. В общем виде получение полуводного гипса из двуводного с помощью термической обработки можно представить в виде выражения



В ходе твердения происходит обратная реакция гидратации.

Возможно также получение гипса из отходов производства гипсовых изделий повторной термической обработкой. Такое использование вторичного сырья снижает нагрузку на окружающую среду [18], однако этот способ практически не применяется в промышленности из-за получаемых высоких показателей по водопотребности, а следовательно, низких по прочности.

При термической обработке в открытых печах при температуре 150–180 °С свободная вода в качестве продукта реакции образует огромное количество мельчайших пор, которые уменьшают качество и ухудшают характеристики получаемого гипса. Этот гипс, впоследствии измельченный, называется строительным, или гипсом β-модификации. Изготовление высокопрочного гипса α-модификации технологически более сложно, но получаемый продукт обладает лучшими свойствами: благодаря нагреванию под высоким давлением в автоклавах до температуры 90–130 °С у α-гипса формируется геометрическая кристаллическая структура, в то время как структура β-модификации больше похожа на хлопьевидные скопления небольших кристаллов. Строение химически одинаковых модификаций отражается на свойствах: α-гипс более прочный и лучше подходит для конструкций, в которых требуется высокая прочность композитов. В то же время гипс β-модификации прост в изготовлении, поэтому также имеет широкое применение во многих отраслях человеческой деятельности. Гипс и изделия из него обладают множеством свойств (таких как легкость, низкая теплопроводность и высокие теплостойкость, огнеупорность, звукопоглощение, гладкая и тонкая поверхность, простота применения в строительстве и т.д.) [19]. Его основные характеристики:

1. Быстрое схватывание и затвердевание, невысокая плотность. После смешивания строительного гипса с водой раствор начинает терять пластичность в течение 5 мин [20, 21] и полностью затвердевает до состояния камня в течение 6–30 мин. Теоретически, поскольку полуводный гипс гидратирует до двуводного, ему требуется всего лишь 18,6 % воды от собственного веса. Однако для того чтобы сохранить необходимую пластичность и удобоукладываемость, ему нужна вода в количестве от 60 до 80 % от собственного веса. После затвердевания излишняя влага испаряется, оставляя в затвердевшем гипсе множество пор, что снижает его прочность. Для контролирования диапазона времени схватывания гипса в него могут добавлять ингибиторы твердения, такие как различные кислоты (лимонная, яблочная, винная, поликарбонные); этилацетат, сульфат калия, бура,

клеевые растворы, например столярного или латексного клея [22, 23]. Выбор замедлителя твердения происходит исходя из условия применения конечного гипсодержащего продукта, требований к его свойствам. Использование замедлителей твердения увеличивает время схватывания до 20–30 мин [20, 21]. Авторы [21] отмечают, что при повышении концентрации замедлителей наблюдается увеличение времени схватывания растворов, однако после достижения определенной концентрации ингибиторов конечный продукт уменьшает прочностные характеристики. При одинаковом замедляющем действии костный клей оказывает наименьшее негативное влияние на механические свойства.

2. Высокие пористость, звуко- и теплоизоляционные свойства. Гипс при твердении образует большое количество пор, которое может достигать 50 % [19]. Таким образом, гипс обладает низким коэффициентом теплопроводности по сравнению с классическими материалами. При этом за счет регулируемого быстрого схватывания гипс возможно использовать в 3D-печати [24, 25], получая благодаря высокой пористости эффективные звукоизоляционные изделия. Однако при такой высокой пористости из-за способности гипса к впитыванию излишков атмосферной влаги испытания на морозостойкость реализуются худшим образом, так как ускоряется разрушение образца.

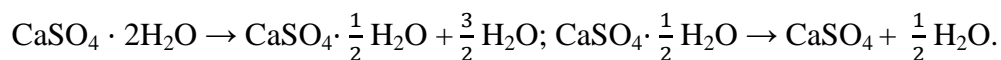
Теплотехнические свойства гипса возможно улучшить введением материалов, способных изменять фазовый состав [26]. Эти материалы аккумулируют излишки тепла днем и излучают их ночью, повышая тепловую инертность конечного композита. В то же время к одним из наиболее энерго- и акустически эффективных гипсовых композитов можно отнести пеногипс. Результаты [27] показали, что гипсовая пена имеет потенциал для тепловой и акустической изоляции гражданских зданий и является более эффективной, чем материалы, используемые в настоящее время.

3. Изменение в объеме. Гипс при твердении увеличивается в объеме на 0,6 %. Это очень важное свойство гипса, которое позволяет применять его во многих областях деятельности человека. Расширение оказывается полезным при использовании гипса в качестве формовочного материала [23], так как позволяет компенсировать усадку металлических форм. При формовании крупных изделий со сложной геометрической формой применяют добавки, нивелирующие изменения гипса в объеме.

4. Высокая паропроницаемость. Благодаря большой теплоемкости строительный гипс обладает способностью в некоторой степени регулировать микроклимат помещения. Высокая паропроницаемость позволяет ограждающим конструкциям из гипса пропускать излишки влаги, что в совокупности с тенденцией пор внутри материала абсорбировать пар из воздуха позволяет материалу регулировать уровень влажности воздуха в помещении [28].

5. Низкая водостойкость. Затвердевший гипс гигроскопичен, в воде медленно диссоциирует, поэтому при постоянном увлажнении теряет прочность и разрушается. Из-за этих особенностей его не используют для внешних отделочных работ и в помещениях с влажностью выше 60 %.

6. Высокая огнеупорность. Строительный гипс имеет малый коэффициент теплопередачи и поэтому медленно отводит излишки тепла от конструкции. Водяной пар, образующийся при нагревании двуводного гипса, испаряется, что может предотвратить распространение огня. При этом происходит эндотермическая реакция дегидратации [29]:



Однако после того как гипс обезвоживается, интенсивность сопротивления его огню снижается, поэтому строительный гипс обладает невысокой огнестойкостью [19]. Исследования [29] указывают на видимые изменения сопротивления гипсобетона огневому воздействию при армировании его стекловолокном или вермикулитом: изменяется не только его механические свойства во время термического воздействия, но и характер растрескивания внутри изделий.

Численные и экспериментальные исследования [30–33] говорят о возможности с достаточной точностью предсказать движение тепловой энергии в толще строительных конструкций с защитными слоями, выполненными из гипса (вплоть до частичного разрушения конструкций). Полученные значения говорят об эффективности применения гипсовых композитов для защиты конструкций и их частей от огневого воздействия.

Ползучесть. При постоянных высоких нагрузках гипсобетон необратимо деформируется. В работе [34] отмечается, что не существует экспериментальных данных, подтверждающих наличие отдельного механизма ползучести для гипса. Авторы [34–36] рассматривают ползучесть гипса как ползучесть раствора под давлением (pressure solution creep), что предполагает растворение и рекристаллизацию гипса в поверхностных слоях воды на локальном уровне, в местах контакта между сцепленными кристаллами. Повышение влажности приводит к увеличению толщины слоя воды между кристаллами гипса. Когда внешняя механическая нагрузка вызывает напряжение на границах раздела двух кристаллов, местная растворимость гипса возрастает. В работе [34] на базе этой концепции был проведен ряд опытов, основанных на формировании кристаллов различного размера из-за разной температуры при твердении, доказывающих значительное влияние поверхности игольчатых кристаллов двуводного гипса на ползучесть материала. Был сделан вывод о влиянии отношения массы воды затворения и гипса. Так, при этом соотношении, которое равно или меньше 0,25, ползучесть образцов полностью отсутствовала. В исследованиях [35, 36] были рассмотрены борная и винная кислоты, натриевая соль полиаминокарбоновой кислоты ($C_{10}H_{16}O_8$), нитрилотриметилфосфоновая кислота ($C_3H_{12}NO_9P_3$) в двух различных заводских исполнениях, гекса-калиевая соль ($C_{10}H_{22}K_6N_2O_{12}P_4$) и триметафосфат натрия ($Na_3P_3O_9$) в качестве добавок к гипсовому вяжущему, потенциально способных уменьшить ползучесть материала. Полученное снижение ползучести было объяснено комплексной механической стабилизацией раствора путем склеивания игольчатых кристаллов гипса с образованием поликристаллической структуры.

7. Коррозионная активность. Поскольку в составе гипса есть негидратированные молекулы воды, этот материал обладает слабокислой средой.

Армирование

Согласно многим исследованиям [13, 19, 22, 37], гипсобетоны без армирования разрушаются с малыми пластическими деформациями, т.е. как хрупкие материалы. Чтобы этого избежать, гипсобетон армируют различными типами армирования.

Армирование с помощью арматурных стержней

Исследования [7, 38] говорят о возможном рН затвердевающего гипсобетона в диапазоне $1,2 < \text{pH} < 8$, что делает классическую стальную арматуру без дополнительного покрытия невозможным. При этом очевидно, что использование такого метода изменит сцепление арматуры и бетона, а также приведет к существенному подорожанию производства изделия из-за увеличенной трудоемкости при создании и возникновения дополнительных расходов на защитные покрытия. Современная арматура, используемая в

гипсобетонах, представляет собой неметаллическую (т.е. композитную) арматуру, получаемую путем скрепления неметаллических волокон различными композитными составами. В статье [39] автор выделяет основные виды композитной арматуры: стеклокомпозитную, базальтокомпозитную, углекомпозитную, арамидокомпозитную и комбинированную композитную.

Композитная арматура обладает рядом преимуществ: равным температурным коэффициентом расширения арматуры и бетона, предотвращающим растрескивание изделий под действием изменений температуры; коррозионной стойкостью; низкой тепло- и электропроводностью [39, 40]. В работах [39, 41, 42] отмечается, что данный тип арматуры обладает несколькими недостатками: малым модулем упругости, вызывающим сложности при проектировании; низкой теплостойкостью, из-за которой композитная арматура теряет свои свойства при нагреве более чем в 200 °С.

Проблема низкой теплостойкости была проанализирована в [42]. Авторы исследования рассмотрели вопрос теоретического расчета прочности балки, армированной композитной арматурой. Ученые, опираясь на проведенные ранее опыты, разработали математическую модель, в которой изучаемая балка разделяется на конечные элементы по всей ее длине и площади поперечного сечения. Затем производился расчет по нелинейно-деформационной модели с учетом дополнительного параметра – расчетной температуры в точке сечения в каждый момент времени. Работоспособность элемента ограничивается граничными условиями:

1. Изгибающий момент не превышает несущую способность.

2. Прогиб элемента не превышает 1/20 от его длины.

3. Скорость прогиба не превышает $L^2 / 9\ 000d$, где L – длина балки, d – высота сжатой зоны.

Данная модель была успешно применена в расчете двух экспериментальных балок. Была получена хорошая сходимость результатов расчетов и экспериментальных значений. Основываясь на этой модели, авторы проанализировали группы балок с различными вариациями их характеристик по каждому из исследуемых параметров и пришли к выводам об армировании балок:

1. Балки, армированные стеклокомпозитной арматурой, имеют более низкую огнестойкость, чем у обычных стальных железобетонных балок. Кроме того, бетонные балки, армированные арматурой из стеклокомпозита, имеют меньшую огнестойкость, чем балки с углекомпозитной арматурой.

2. Защитный слой бетона оказывает значительное влияние на скорость распространения температуры в теле балки, на огнестойкость конструкции в целом. Таким образом, утолщение защитного слоя может повысить теплостойкость композитного армирования.

3. Значительное влияние оказывают внешние воздействия и тип закрепления балки: обыкновенная балка с закреплением в продольном перемещении показывает лучшие результаты, чем балка без ограничения в продольном перемещении.

Таким образом, недостаток теплостойкости композитной арматуры нивелируется грамотным расчетом и проектированием конструкций.

Армирование фиброй

Гипс, армированный волокнами, является распространенным строительным материалом. В нем короткие волокна с высокой прочностью на растяжение внедряются в гипсовую матрицу для получения дополнительных прочных и легких строительных материалов [37]. Армирование гипсовых композитов фиброй было рассмотрено в работах

[13, 15, 16, 22, 37]. В работе [13] было проанализировано армирование древесной фиброй 0–7,5 % по весу, которое ухудшило прочность на сжатие и изгиб. Аналогичная ситуация наблюдалась при армировании тонких гипсовых композитов джутовыми волокнами [22]. При этом авторы [22] пришли к выводу, что подобное снижение прочности обусловлено низким качеством обработки фибры или ее полным отсутствием, которое в итоге сказывается на адгезии бетона и фибры. Обработка поверхности различными методами уменьшило снижение прочности образцов. В то же время образцы, армированные фиброй на основе стекломата, несколько увеличили прочность на изгиб. Прочность образцов с таким типом армирования растет по мере увеличения длины фибры до достижения плато графика прочности, после чего прочность образцов начинает в большей степени зависеть от качества предварительной обработки и адгезии между фиброй и бетоном [16]. При этом прочность гипсофибробетонов на натуральных волокнах, а именно на обработанных NaOH волокнах джута Конго, обладает рядом преимуществ перед стекломатовым армированием: имеет высокие прочностные и термические свойства, а также предотвращает образование и раскрытие трещин при аутогенной усадке.

В работе [37] были исследованы и испытаны гипсовые композиты на основе полипропиленовых волокон и волокон из поливинилового спирта. Авторы отмечают, что добавление этой фибры может значительно сократить время схватывания у раствора, а их дозирование и увеличение в размере снижают пластичность получаемой смеси. При этом граница раздела фаз между волокнами из поливинилового спирта и кристаллами дигидрата была плотной и небольшой (по сравнению с образцом, армированным полипропиленовыми волокнами), что в итоге отразилось на прочности: оба материала значительно повысили прочность на сжатие и изгиб, при этом волокна из поливинилового спирта имели больший эффект. В работе [15] также проводились исследования, направленные на получение гипсового композита, армированного полипропиленовой фиброй, однако автор отмечает, что обрабатываемость смеси при добавлении фибры количеством менее 3,5 % снижает обрабатываемость незначительно, а прочность на сжатие и изгиб – уменьшается.

При применении в бетонах армирования фиброй различных размеров и химического состава может быть достигнут синергетический эффект [43]. Таким образом, использование фибры в гипсовых композитах (независимо от ее происхождения) позволяет преобразовать хрупкое разрушение материала в пластичное через восприятие части нагрузки даже после формирования крупных трещин. Тем временем прочность образцов увеличивается или уменьшается в зависимости от качества адгезии фибры и бетона, что делает применение искусственных волокон при армировании более предпочтительным.

Комплексное армирование

В исследовании [44] проводились испытания различных вариаций армирования образцов на портландцементе с добавками микрокремнезема (10 % по весу) и отходов порошка стекла (25 % по весу). Был испытан ряд образцов-кубиков и образцов-балочек на сжатие и изгиб соответственно. Исследователи пришли к выводу о том, что добавление 1,5 % волокон в неармированный образец привело к увеличению прочности бетона на 4,6 %. В то же время образцы-балочки, армированные композитной арматурой, показали прочность при изгибе на 18 % меньше, чем у образцов со стальной арматурой. Этот недостаток был устранен в образце с комплексным армированием, в котором при добавлении 1,5 % полипропиленовых волокон в балку, армированную стеклопластиковой арматурой, получилось достигнуть прочности, сравнимой с балкой, армированной

стальной арматурой. При этом во всех образцах добавление полипропиленовой фибры обеспечило пластичное разрушение.

Наноармирование

Современные исследования показывают, что структура бетонов может оказывать большое влияние на конечные свойства композита. Модификацию структуры для гипсобетонов возможно произвести путем внедрения в нее нитевидных кристаллов этtringита, которые армируют гипсовую матрицу [45]. В работе [46] указывается, что применение этtringита в составе цементной композиции позволяет повысить прочностные характеристики вяжущего как в ранние, так и в более поздние сроки твердения. Увеличение отношения количества этtringита с малыми диаметрами (≤ 10 мкм) к количеству этtringита с большими диаметрами позволяет повысить эффективность «нанозатравки». Согласно исследованию [47], это может происходить из-за увеличения дзета-потенциала поверхности фибры при уменьшении ее диаметра, что способствует повышению адгезии частиц твердой фазы вокруг фибры.

Возможно, помимо использования кристаллов, добавление в смесь фибры с размерами, близкими к размерам кристаллов. Такие добавки следует отнести к нанозаполнителям. Поскольку наночастицы имеют огромную удельную поверхность, они могут при малых концентрациях в объеме усиливать матрицу межфазными граничными слоями, одновременно с этим заполняя молекулярный свободный объем из-за своего малого размера, повышая тем самым плотность упаковки [48].

Для армирования могут быть использованы нанодисперсные модификаторы, способствующие формированию в процессе твердения дополнительных структурных связей [49]. Так, упрочнение структуры гипсобетонов и повышение их механических характеристик возможны за счет дополнительного армирования структуры кристаллами этtringита [49]. При этом необходимо учитывать, что армирующие элементы на всех масштабных уровнях армирования бетонов, в том числе и наноуровне, могут иметь различия, например, в агрегатном, фазовом составе, размерах, форме, их ориентации, что безусловно будет отражаться на сопротивлении разрушению материала (композита) [50]. Тогда структура проектируемой строительной конструкции может рассматриваться как пространственно-геометрическая система, обладающая многоуровневой «масштабной иерархичностью», представленная совокупностью ее элементов [50].

Проведенное исследование показало, что гипсобетон является перспективным материалом в современной строительной отрасли. Он обладает многими преимуществами перед прочими традиционными материалами, однако сегодня в РФ используется редко при строительстве зданий. Основные причины такого положения дел: недостаточная освещенность в нормативной документации ряда вопросов, касающихся расчета и производства конструкций; отсутствие автономных или интегрированных программных комплексов, позволяющих решать подобные задачи.

ВЫВОДЫ

Для проектирования смесей для конструкционных гипсовых композитов следует использовать α -модификацию гипса, поскольку она обладает более плотной структурой и имеет значительный прочностной потенциал.

Использование стального армирования в гипсовых композитах невозможно без дополнительной защиты арматуры из-за коррозионной активности материала. Следует отдавать предпочтение армирующим материалам, устойчивым к слабокислым средам.

Нужно точно определять модуль упругости арматурных стержней и бетона, поскольку неправильно подобранный материал стержня приведет к его неэффективной работе, что потребует использования больших диаметров этих арматурных стержней.

Армирование фиброй, различной по размеру, форме, ориентации, составу и происхождению, может обеспечить синергетический эффект (равно как и одновременное использование армирующих элементов и арматуры).

В дальнейшем наиболее перспективными исследованиями, по нашему мнению, будут те, которые направлены на получение уточненных данных о расчетных характеристиках гипсобетона, модуля упругости и ползучести гипсового камня. Эти значения необходимы для расчета элементов из гипсобетона по нелинейно-деформационной модели, а также компьютеризированного расчета конструкций по огнестойкости. При этом наиболее важным представляется изучение гипсобетонов на основе комплексного армирования с использованием композитной арматуры и дополнительного микро- и наноармирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Б.В., Фаликман В.Р. Бетон и железобетон в эпоху устойчивого развития // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 2. С. 30–38.
2. Sabbie A. Miller, Frances C. Moore climate and health damages from global concrete production // *Nature climate change*. 2020. № 10. Pp. 439–443.
3. Miller S.A., Horvath A., Monteiro P.J.M. Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20 % // *IOP Publishing*. 2016. № 11 (7). P. 074029.
4. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., Житковский В.В. Расчет составов мелкозернистого гипсобетона на плотных заполнителях // *Строительные материалы*. 2012. № 10. С. 48–49.
5. Чомаева М.Н. Цементное производство – вред для здоровья человека // *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2018. Vol. 1–1. С. 6–8.
6. Мусина Э.Б. Оценка влияния цементной промышленности на загрязнение окружающей среды на примере АО «Карцемент» // *Гидрометеорология и экология*. 2020. № 2. С. 73–80.
7. Singh M., Garg M. Retarding action of various chemicals on setting and hardening characteristics of gypsum plaster at different pH // *Cement and Concrete Research*. 1997. Pp. 947–950.
8. Freire M.T., Silva A.S., Veiga M.R., Brito J. Studies in ancient gypsum based plasters towards their repair: Mineralogy and microstructure // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 196. Pp. 512–529.
9. Freire M.T., Veiga M.R., Silva A.S., Brito J. Restoration of ancient gypsum-based plasters: Design of compatible materials // *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 202. Pp. 319–331.
10. Potskhishvili G., Pasian C., Piqué F. Development of a gypsum-based grout for the stabilisation of gypsum-based plasters // *6th Historic Mortars Conference*. Slovenia: Ljubljana, 2022.

11. Caillaha M., Moura F. Technical feasibility for use of FGD gypsum as an additive setting time retarder for portland cement // *Journal of Materials and Research and Technology*. 2017. Vol. 7. Iss. 2. Pp. 190–197.
12. Chernyshova N., Lesovik V., Fediuk R., Timokhin R. Enhancement of fresh properties and performances of the eco-friendly gypsum-cement composite (EGCC) // *Construction and Building Materials*. 2020. № 11. Pp. 1–10.
13. Hošťálková M., Vavřínová N., Longauerová V. Mechanical properties of the gypsum composite reinforcement with wooden fibers // *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.* 2019. № 10 (1). Pp. 15–21.
14. Ouakarrouch M., Azhary K.E., Laaroussi N., Garoum M., Kifani-Sahban F. Thermal performances and environmental analysis of a new composite building material based on gypsum plaster and chicken feathers waste // *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020. № 19. Pp. 100642.
15. Romero-Gomez M.I., Pedreño-Rojas M.A., Perez-Galvez F., Rubio-de-Hita P. Characterization of gypsum composites with polypropylene fibers from non-degradable wet wipes // *Journal of Building Engineering*. 2020. № 34 (8). Pp. 101874.
16. Kengoh J.B., Etape E.P., Namondo B.V., Foba-Tendo J., Nafu Y.R., Fabien B.E. Influence of urena lobata fibre treatment on mechanical performance development in hybrid urena lobata: fibre / Gypsum Plaster Composites // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. № 12. Pp. 1–10.
17. Бахтин А.И., Кольчугин А.Н., Ескин А.А. Геохимические особенности осаждения // *Ученые записки Казанского университета*. 2012. Т. 154. С. 55–60.
18. Pedreno-Rojas M.A., Fort J., Cerný R., Rubio-de-Hita P. Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context // *Journal of Cleaner Production*. 2020. № 253 (4). Pp. 120056.
19. Li Y., Ren S. Building decorative materials. Elsevier, 2011. 420 p.
20. Торпищев Ш.К., Тлеуленова Г.Т., Кабдышева Б.Н. Эффективный замедлитель схватывания гипсовых вяжущих // *Наука и техника Казахстана*. 2004. № 1. С. 168–171.
21. Zhang Y., Yang J., Cao X. Effects of several retarders on setting time and strength of building gypsum // *Construction and Building Materials*. 2020. № 240 (07). Pp. 117927.
22. Ngah S.A., Dams B., Ansell M.P., Stewart J., Hempstead R., Ball R.J. Structural Performance of Fibrous Plaster. Part 1: Physical and mechanical properties of hessian and glass fibre reinforced gypsum composites // *Construction and Building Materials*. 2020. № 259 (1). Pp. 120396.
23. Нурт ван Р. Основы стоматологического материаловедения. М.: КМК-Инвест, 2002. 304 с.
24. Dantasa A.C.S., Scalabrinb D.H., Fariasb R.D., Barbosaa A.A., Ferraza A.V., Wirthc C. Design of highly porous hydroxyapatite scaffolds by conversion of 3D-printed gypsum structures – a comparison study // *Procedia CIRP*. 2016. № 49. Pp. 55–60.
25. Shakora P., Nejadia S., Paulb G., Sanjayanc J. Dimensional accuracy, flowability, wettability, and porosity in inkjet 3DP for gypsum and cement mortar materials // *Automation in Construction*. 2020. Vol. 110. Pp. 102964.
26. Zhang Y., Tao W., Wang K., Li D. Analysis of thermal properties of gypsum materials incorporated with microencapsulated phase change materials based on silica // *Renewable Energy*. 2020. № 149 (3).

27. Arroyo F.N., Christoforo A.L., Salvini V.R., Pelissari P.I.B.G.B., Pandolfelli V.C. Development of plaster foam for thermal and acoustic applications // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262. Pp. 120800.
28. Santos T., Idália Gomes M., Santos Silva A., Ferraz E., Faria P. Comparison of mineralogical, mechanical and hygroscopic characteristic of earthen, gypsum and cement-based plasters // *Construction and Building Materials*. 2020. № 254. Pp. 1–11.
29. Du Z., She W., Zuo W., Hong J., Zhang Y., Miao C. Foamed gypsum composite with heat-resistant admixture under high temperature: Mechanical, thermal and deformation performances // *Cement and Concrete Composites*. 2020. № 108. Pp. 103549.
30. Nassif A.Y., Yoshitake I., Allam A. Full-scale fire testing and numerical modelling of the transient thermo-mechanical behaviour of steel-stud gypsum board partition walls // *Construction and Building Materials*. 2014. № 59. Pp. 51–61.
31. Thi V.D., Khelifa M., Oudjene M., El Ganaoui M., Rogaume Y. Numerical simulation of fire integrity resistance of full-scale gypsum-faced cross-laminated timber wall // *International Journal of Thermal Sciences*. 2018. № 132. Pp. 96–103.
32. Chen W., Ye J., Zhao Q., Jiang J., Liu K., Zhang M., Xu C. Mid-scale and full-scale experiments of cavity-insulated gypsum and calcium-silicate sheathed CFS walls under different fire exposures // *Thin-Walled Structures*. 2020. № 155 (1). Pp. 1–21.
33. Chen W., Ye J., Zhao Q., Jiang J. Full-scale experiments of gypsum-sheathed cavity-insulated cold-formed steel walls under different fire conditions // *Journal of Constructional Steel Research*. 2020. № 164. Pp. 1–21.
34. Schug B., Mandel K., Schottner G., Shmeliov A., Nicolosi V., Baese R., Pietschmann B., Biebl M., SEXTL G. A mechanism to explain the creep behavior of gypsum plaster // *Cement and Concrete Research*. 2017. № 98. Pp. 122–129.
35. Schug B., Mandel K., Schottner G., Shmeliov A., Nicolosi V., Baese R., Förthner S., Pietschmann B., Biebl M., SEXTL G. Revealing the working principle of sodium trimetaphosphate as state of the art anti-creep agent in gypsum plaster // *Cement and Concrete Research*. 2018. № 107. Pp. 182–187.
36. Pachon-Rodriguez E.A., Guillon E., Houvenaghel G., Colombani J. Wet creep of hardened hydraulic cements – Example of gypsum plaster and implication for hydrated Portland cement // *Cement and Concrete Research*. 2014. № 63. Pp. 67–74.
37. Zhu C., Zhang J., Peng J., Cao W., Liu J. Physical and mechanical properties of gypsum-based composites reinforced with PVA and PP fibers // *Construction and Building Materials*. 2018. № 163. Pp. 695–705.
38. Guan B., Shen Z., Wu Z., Yang L., Ma X. Effect of pH on the preparation of α -calcium sulfate hemihydrate from FGD gypsum with the hydrothermal Method // *Journal of the American Ceramic Society*. 2008. № 91 (12). Pp. 3835–3840.
39. Полищук А.С. Композитная арматура: история и особенности // *Вестник магистратуры*. 2018. № 7 (82). С. 31–32.
40. ACI 440.1R-15 Full-scale experiments of gypsum-sheathed cavity-insulated cold-formed steel walls under different fire conditions, American Concrete Institute, 2015.
41. Долгих М.В., Федосова О.Г., Дергач И.А., Ондар А.А., Преимущества и недостатки применения композитной арматуры // *Инновации и инвестиции*. 2019. № 10. С. 298–300.
42. Yu B., Kodur V.K.R. Factors governing the fire response of concrete beams reinforced with FRP rebars // *Composite Structures*. 2013. № 100. Pp. 257–269.
43. Abbass W., Khan M.I. Mechanical properties of Hybrid steel/PVA fiber reinforced high strength concrete // *MATEC Web of Conferences*. 2018. № 199 (9). Pp. 11005.

44. Orouji M., Najaf E. Effect of GFRP rebars and polypropylene fibers on flexural strength in high-performance concrete beams with glass powder and microsilica // *Case Studies in Construction Materials*. 2022. № 8.150.
45. Петропавловский К.С. Самоармированные гипсовые материалы с комплексным модификатором. Дисс... канд. техн. наук. Москва. 2020. 208 с.
46. Еленова А.А. Разработка комплексной добавки для ускоренного твердения цементного камня. Дисс... канд. техн. наук. Москва. 2017. 164 с.
47. Моргун Л.В., Вотрин Д.А., Моргун В.Н. Влияние диаметра дисперсной арматуры на скорость фазового перехода в фибропенобетонных смесях // *Строительные материалы*. 2018. № 11. С. 27–31.
48. Хозин В.Г., Старовойтова И.А., Майсурадзе Н.В., Зыкова Е.С., Халикова Р.А., Корженко А.А., Тринеева В.В., Яковлев Г.И. Наномодифицирование полимерных связующих для конструкционных композитов // *Строительные материалы*. 2013. № 2. С. 4–10.
49. Петропавловский К.С., Петропавловская В.Б., Бурьянов А.Ф., Новиченкова Т.Б., Фишер Х.-Б. Самоармированные гипсовые композиты // *Строительные материалы*. 2014. № 7. С. 19–22.
50. Чернышов Е.М., Дьяченко Е.И., Макеев А.И. Неоднородность структуры и сопротивление разрушению конгломератных строительных композитов: вопросы материаловедческого обобщения и развития теории. Воронеж: ВГАСУ, 2012. 98 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КАЛЯСКИН Петр Александрович – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: dr.d1708@yandex.ru

ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ Виктория Борисовна – доктор технических наук, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

БАРКАЯ Темур Рауфович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ Кирилл Сергеевич – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

НОВИЧЕНКОВА Татьяна Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tanovi.69@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Каляскин П.А., Петропавловская В.Б., Баркая Т.Р., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б. Влияние типа армирования гипсобетона на его свойства // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 1 (17). С. 27–41.

**INFLUENCE OF GYPSUM CONCRETE REINFORCEMENT TYPE
ON ITS PROPERTIES**

*P.A. Kalyaskin, V.B. Petropavlovskaya, T.R. Barkaya, K.S. Petropavlovskii,
T.B. Novichenkova*
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article is an overview of the methods of reinforcement of gypsum concrete. Modern construction requires a constant search for new efficient, environmentally friendly and low-cost components. Gypsum materials can meet these requirements. Currently, they are widely used for interior finishing works, for the production of enclosing structures and decorative elements. Composite gypsum materials are among the most advanced building components, due to their cost-effectiveness due to the widespread use of gypsum, environmental friendliness, fire resistance, ease of installation and low energy consumption of production, but they have a number of disadvantages, such as fragility and low mechanical characteristics, which limits their further use. The reinforcement of gypsum materials significantly increases the strength characteristics, but the creation of composite materials based on gypsum is one of the developing and little-studied areas in the field of materials production. This review serves as a basis for further research on ways to improve the characteristics of gypsum-based materials using various reinforcements to expand the scope of use of gypsum products and gypsum-based building mixes.

Keywords: gypsum concrete, reinforcement, regulation of properties.

REFERENCES

1. Gusev B.V., Falikman V.R. Concrete and reinforced concrete in the era of sustainable development. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2016. No. 2, pp. 30–38.
2. Sabbie A. Miller, Frances C. Moore climate and health damages from global concrete production. *Nature climate change*. 2020. No. 10, pp. 439–443.
3. Miller S.A., Horvath A., Monteiro P.J.M. Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20 %. *IOP Publishing*. 2016. No. 11 (7), pp. 074029.
4. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L., Zhitkovsky V.V. Calculation of compositions of fine-grained gypsum concrete on dense aggregates. *Stroitel'nye materialy*. 2012. No. 10, pp. 48–49.
5. Chomaev M.N. Cement production is the harm to human health. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2018. Vol. 1–1, pp. 6–8.
6. Musina E.B. Assessment of the impact of the cement industry on environmental pollution on the example of JSC «Kartsement». *Gidrometeorologiya i ekologiya*. 2020. No. 2, pp. 73–80.
7. Manjit Singh, Mridul Garg. Retarding action of various chemicals on setting and hardening characteristics of gypsum plaster at different pH. *Cement and Concrete Research*. 1997, pp. 947–950.
8. Freire M.T., Silva A.S., Veiga M.R., Brito J. Studies in ancient gypsum based plasters towards their repair: Mineralogy and microstructure. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 196, pp. 512–529.
9. Freire M.T., Veiga M R., Silva A.S., Brito J. Restoration of ancient gypsum-based plasters: Design of compatible materials. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 202, pp. 319–331.

10. Potskhishvili G., Pasian C., Piqué F. Development of a gypsum-based grout for the stabilisation of gypsum-based plasters. *6th Historic Mortars Conference*. Slovenia: Ljubljana, 2022.
11. Caillahua M., Moura F. Technical feasibility for use of FGD gypsum as an additive setting time retarder for portland cement. *Journal of Materials and Research and Technology*. 2017. Vol. 7. Iss. 2, pp. 190–197.
12. Chernyshova N., Lesovik V., Fediuk R., Timokhin R. Enhancement of fresh properties and performances of the eco-friendly gypsum-cement composite (EGCC). *Construction and Building Materials*. 2020. No. 11, pp. 1–10.
13. Hošťálková M., Vavřínová N., Longauerová V. Mechanical properties of the gypsum composite reinforcement with wooden fibers. *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.* 2019. No. 10 (1), pp. 15–21.
14. Ouakarrouch M., Azhary K.E., Laaroussi N., Garoum M., Kifani-Sahban F. Thermal performances and environmental analysis of a new composite building material based on gypsum plaster and chicken feathers waste. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2020. No. 19, pp. 100642.
15. Romero-Gomez M.I., Pedreño-Rojas M.A., Perez-Galvez F., Rubio-de-Hita P. Characterization of gypsum composites with polypropylene fibers from non-degradable wetwipes. *Journal of Building Engineering*. 2020. No. 34 (8), pp. 101874.
16. Kengoh J.B., Etape E.P., Namondo B.V., Foba-Tendo J., Nafu Y.R., Fabien B.E. Influence of urena lobata fibre treatment on mechanical performance development in hybrid urena lobata: fibre / Gypsum Plaster Composites. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. No. 12, pp. 1–10.
17. Bakhtin A.I., Kolchugin A.N., Eskin A.A. Geochemical features of deposition. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta*. 2012. Vol. 154, pp. 55–60.
18. Pedreno-Rojas M.A., Fort J., Cerný R., Rubio-de-Hita P. Life cycle assessment of natural and recycled gypsum production in the Spanish context. *Journal of Cleaner Production*. 2020. No. 253 (4), pp. 120056.
19. Li Y., Ren S. *Building decorative materials*. Elsevier, 2011. 420 p.
20. Torpishchev Sh.K., Tleulenova G.T., Kabdysheva B.N. Effective retarder of setting gypsum binders. *Nauka i tekhnika Kazahstana*. 2004. No. 1, pp. 168–171.
21. Zhang Y., Yang J., Cao X. Effects of several retarders on setting time and strength of building gypsum. *Construction and Building Materials*. 2020. No. 240 (07), pp. 117927.
22. Ngah S.A., Dams B., Ansell M.P., Stewart J., Hempstead R., Ball R.J. Structural Performance of Fibrous Plaster. Part 1: Physical and mechanical properties of hessian and glass fibre reinforced gypsum composites. *Construction and Building Materials*. 2020. No. 259 (1), pp. 120396.
23. Nurt van R. *Osnovy stomatologicheskogo materialovedeniya [Fundamentals of dental materials science]*. M.: KMK-Invest, 2002. 304 p.
24. Dantasa A.C.S., Scalabrin D.H., Farias R.D., Barbosaa A.A., Ferraza A.V., Wirth C. Design of highly porous hydroxyapatite scaffolds by conversion of 3D-printed gypsum structures – a comparison study. *Procedia CIRP*. 2016. No. 49, pp. 55–60.
25. Shakora P., Nejadia S., Paulb G., Sanjayanc J. Dimensional accuracy, flowability, wettability, and porosity in inkjet 3DP for gypsum and cement mortar materials. *Automation in Construction*. 2020. Vol. 110, pp. 102964.

26. Zhang Y., Tao W., Wang K., Li D. Analysis of thermal properties of gypsum materials incorporated with microencapsulated phase change materials based on silica. *Renewable Energy*. 2020. No. 149 (3).
27. Arroyo F.N., Christoforo A.L., Salvini V.R., Pelissari P.I.B.G.B., Pandolfelli V.C. Development of plaster foam for thermal and acoustic applications. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262, pp. 120800.
28. Santos T., Idália Gomes M., Santos Silva A., Ferraz E., Faria P. Comparison of mineralogical, mechanical and hygroscopic characteristic of earthen, gypsum and cement-based plasters. *Construction and Building Materials*. 2020. No. 254, pp. 1–11.
29. Du Z., She W., Zuo W., Hong J., Zhang Y., Miao C. Foamed gypsum composite with heat-resistant admixture under high temperature: Mechanical, thermal and deformation performances. *Cement and Concrete Composites*. 2020. No. 108, pp. 103549.
30. Nassif A.Y., Yoshitake I., Allam A. Full-scale fire testing and numerical modelling of the transient thermo-mechanical behaviour of steel-stud gypsum board partition walls. *Construction and Building Materials*. 2014. No. 59, pp. 51–61.
31. Thi V.D., Khelifa M., Oudjene M., El Ganaoui M., Rogaume Y. Numerical simulation of fire integrity resistance of full-scale gypsum-faced cross-laminated timber wall. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018. No. 132, pp. 96–103.
32. Chen W., Ye J., Zhao Q., Jiang J., Liu K., Zhang M., Xu C. Mid-scale and full-scale experiments of cavity-insulated gypsum and calcium-silicate sheathed CFS walls under different fire exposures. *Thin-Walled Structures*. 2020. No. 155 (1), pp. 1–21.
33. Chen W., Ye J., Zhao Q., Jiang J. Full-scale experiments of gypsum-sheathed cavity-insulated cold-formed steel walls under different fire conditions. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020. No. 164, pp. 1–21.
34. Schug B., Mandel K., Schottner G., Shmeliov A., Nicolosi V., Baese R., Pietschmann B., Biebl M., SEXTL G. A mechanism to explain the creep behavior of gypsum plaster. *Cement and Concrete Research*. 2017. No. 98, pp. 122–129.
35. Schug B., Mandel K., Schottner G., Shmeliov A., Nicolosi V., Baese R., Förthner S., Pietschmann B., Biebl M., SEXTL G. Revealing the working principle of sodium trimetaphosphate as state of the art anti-creep agent in gypsum plaster. *Cement and Concrete Research*. 2018. No. 107, pp. 182–187.
36. Pachon-Rodriguez E.A., Guillon E., Houvenaghel G., Colombani J. Wet creep of hardened hydraulic cements – Example of gypsum plaster and implication for hydrated Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2014. No. 63, pp. 67–74.
37. Zhu C., Zhang J., Peng J., Cao W., Liu J. Physical and mechanical properties of gypsum-based composites reinforced with PVA and PP fibers. *Construction and Building Materials*. 2018. No. 163, pp. 695–705.
38. Guan B., Shen Z., Wu Z., Yang L., Ma X. Effect of pH on the preparation of a-calcium sulfate hemihydrate from FGD gypsum with the hydrothermal Method. *Journal of the American Ceramic Society*. 2008. No. 91 (12), pp. 3835–3840.
39. Polishchuk A.S. Composite reinforcement: history and features. *Vestnik magistratury*. 2018. No. 7 (82), pp. 31–32.
40. ACI 440.1R-15 Full-scale experiments of gypsum-sheathed cavity-insulated cold-formed steel walls under different fire conditions, American Concrete Institute, 2015.
41. Dolgikh M.V., Fedosova O.G., Dergach I.A., Ondar A.A., Advantages and disadvantages of using composite reinforcement. *Innovacii i investicii*. 2019. No. 10, pp. 298–300.

42. Yu B., Kodur V.K.R. Factors governing the fire response of concrete beams reinforced with FRP rebars. *Composite Structures*. 2013. No. 100, pp. 257–269.
43. Abbass W., Khan M.I. Mechanical properties of Hybrid steel/PVA fiber reinforced high strength concrete. *MATEC Web of Conferences*. 2018. No. 199 (9), pp. 11005.
44. Orouji M., Najaf E. Effect of GFRP rebars and polypropylene fibers on flexural strength in high-performance concrete beams with glass powder and microsilica. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. No. 8.150.
45. Petropavlovskii K.S. Self-reinforced gypsum materials with a complex modifier. Cand. Diss. (Engineering). Moscow. 2020. 208 p.
46. Elenova A.A. Development of a complex additive for accelerated hardening of cement stone. Cand. Diss. (Engineering). Moscow. 2017. 164 p.
47. Morgun L.V., Votrin D.A., Morgun V.N. Influence of the diameter of dispersed reinforcement on the rate of phase transition in fibropen concrete mixtures. *Stroitel'nye materialy*. 2018. No. 11, pp. 27–31.
48. Khozin V.G., Starovoitova I.A., Maisuradze N.V., Zykova E.S., Khalikova R.A., Korzhenko A.A., Trineeva V.V., Yakovlev G.I. Nanomodification of polymer binders for constructional composites // *Stroitel'nye materialy*. 2013. No. 2, pp. 4–10.
49. Petropavlovskii K.S., Petropavlovskaya V.B., Buryanov A.F., Novichenkova T.B., Fisher H.-B. Self-reinforced gypsum composites. *Stroitel'nye materialy*. 2014. No. 7, pp. 19–22.
50. Chernyshov E.M., Dyachenko E.I., Makeev A.I. Neodnorodnost' struktury i soprotivlenie razrusheniyu konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov: voprosy materialovedcheskogo obobshcheniya i razvitiya teorii [Heterogeneity of structure and resistance to destruction of conglomerate building composites: issues of materials science generalization and theory development]. Voronezh: VGASU, 2012. 98 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KALYASKIN Petr Alexandrovich – graduate student, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: dr.d1708@yandex.ru

PETROPAVLOVSKAYA Viktoriya Borisovna – doctor of technical sciences, professor of the department of building materials and structures, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

BARKAYA Temur Raufovich – candidate of technical sciences, head of the department of constructions and structures, FSBEI HE «Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

PETROPAVLOVSKII Kirill Sergeevich – candidate of technical sciences, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

NOVICHENKOVA Tatiana Borisovna – candidate of technical sciences, associate professor of the department of building materials and structures, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tanovi.69@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kalyaskin P.A., Petropavlovskaya V.B., Barkaya T.R., Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B. Influence of gypsum concrete reinforcement type on its properties // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2023. No. 1 (17), pp. 27–41.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.33:621.316.1

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРОСЕТЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДА***К.Б. Корнеев, М.С. Хрусталева, В.В. Сизова**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Корнеев К.Б., Хрусталева М.С.,
Сизова В.В., 2023

Аннотация. Указано, что переход на электромобили сделал необходимым значительную реконструкцию сети электроснабжения городов. Сделан вывод, что наличие зарядных станций большой мощности оказывает огромное влияние на график электропотребления городов. Перечислены причины, которые мешают внедрению в Российской Федерации станций зарядки с использованием возобновляемых источников энергии. Отмечено, что постепенное расширение парка электромобилей потребует внесения поправок в нормативные документы, регламентирующие технические, экологические и экономические аспекты функционирования городской среды.

Ключевые слова: электромобиль, электроснабжение, график нагрузок, зарядные станции, городская инфраструктура.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-42-54

Появление относительно доступных электромобилей привело к тому, что данные транспортные средства набирают популярность среди широких слоев населения [1–4]. Так как цены на батареи падают [5], преимущества электромобилей для потребителей становятся очевидными. В 2021–2022 гг. практически каждый крупный производитель автомобилей объявил о планах перехода на электрические или подключаемые гибридные автомобили. В городах многие стремятся извлечь выгоду из использования электромобилей (от снижения затрат на техническое обслуживание до улучшения качества воздуха). Однако государственные и крупные частные структуры в указанном виде населенных пунктов должны подготовить инфраструктуру к распространению электромобилей. Помимо того, что цены на аккумуляторы этих транспортных средств невелики, рассматриваемые машины имеют самую низкую совокупную стоимость владения на рынке легковых автомобилей и будут продолжать становиться все более доступными для среднего потребителя. В дополнение к низким затратам на техническое обслуживание и «топливо» электромобили также обеспечивают бесшумную работу и отсутствие выбросов выхлопных газов, что делает их удачным выбором как с экологической, так и экономической точки зрения. Таким образом, использование

электромобилей может помочь городским властям улучшить качество воздуха (особенно в районах вдоль основных автомагистралей и автострад), сэкономить деньги на автопарке, снизить налоги, ограничить зависимость городов от неустойчивых цен на нефть и бензин и т.д. В эпоху, когда все чаще в крупных населенных пунктах стремятся сократить потребление топлива и объем выбросов парниковых газов, содействие внедрению электромобилей становится жизненно важным инструментом совершенствования энергетики и в целом устойчивого развития страны.

Из-за роста количества электромобилей на дорогах потребуется улучшить инфраструктуру. Города могут (и должны) играть огромную роль в формировании лучшего будущего. Согласно недавнему анализу [6], опубликованному Национальной лабораторией возобновляемых источников энергии (NREL) и посвященному установлению объема инфраструктуры, необходимой для преобразования рынка электромобилей, крупным городам США потребуется 4 900 станций быстрой зарядки постоянного тока, небольшим городам – 3 200, в то время как междугородним магистральным дорогам – всего 400. Это позволит обеспечить среднее количество около 50 зарядных станций на каждую тысячу машин.

Прогнозные мировые значения показывают, что более половины выпускаемых к 2030 г. легковых машин в мире будет передвигаться на электротяге (при условии, что емкость авторынка не особо изменится по сравнению с нынешней). Чтобы поддержать подобные темпы экспансии производства электромобилей, участникам рынка и их партнерам предстоит ввести в строй предприятия по выпуску тяговых батарей совокупной емкостью 5,8 ТВт·ч/г. к концу десятилетия.

Отметим, что сложившийся план застройки и системы электроснабжения города оказывает огромное влияние на то, как и где будет создаваться инфраструктура зарядных станций. В этом случае электроснабжающие компании выступают важным и необходимым партнером в деле преобразования рынка, помогающим сделать электромобили важной частью национального парка легковых транспортных средств. Поэтому в городах должны быть готовы к внедрению электромобилей и на уровне политики, нормативного регулирования, и на в техническом (при планировании государственной и частной инфраструктуры).

Принятие нормативных актов, поддерживающих использование электромобилей и включающих описание оборудования для зарядки электромобилей при проектировании и реконструкции жилых и коммерческих зданий, является важным шагом на пути к созданию городской среды, пригодной для эксплуатации рассматриваемого транспорта. В частности, стандарты парковки дают уникальную возможность создавать здания и коммерческие объекты, готовые к повсеместному применению электромобилей. Многоквартирные дома, коммерческие объекты и комплексы смешанного типа могут быть спроектированы с учетом перехода на электромобили и получения различных социальных преимуществ, включая возможность дополнительного развития альтернативной энергетики. Однако применительно к территории РФ существуют значительные ограничения, связанные с использованием ветровой и солнечной энергетики [8] для обеспечения зарядки вышеназванных машин. На рис. 1 представлена схема эффективности использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) на территории РФ.

Эффективность использования ВИЭ



Низкая Средняя Высокая



Рис. 1. Карта распределения зон эффективности использования ВИЭ [17]

Все автомобили, которые называют электрическими, можно разделить на несколько классов:

1. Собственно электромобили, или BEV (Battery Electric Vehicle), – транспортные средства на аккумуляторных батареях, использующие для движения один или несколько электродвигателей, источником питания для которых выступают аккумуляторные батареи. К таким автомобилям относят Audi e-tron, Porsche Taycan, Nissan Leaf, Mitsubishi i-MiEV и различные модели Tesla.

2. Подключаемые гибриды, или PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle), – машины, которые используют для зарядки аккумуляторных батарей не только системы рекуперации энергии при торможении или во время движения, но и внешние источники электроэнергии. К указанным гибридам принадлежат Toyota Prius, Chevrolet Volt.

3. «Обычные» гибриды, или HEV (Hybrid Electric Vehicle), – гибриды, которые заряжают установленные аккумуляторные батареи только за счет работы двигателя внутреннего сгорания или особенностей движения по трассе.

По статистическим данным, свыше половины всех электромобилей различных типов [3] в 2021 г. приходится на Дальневосточный федеральный округ (доля – 58 %), что связано с постоянным импортом подобных машин из Японии и Южной Кореи. Около 15 % зарегистрировано в Сибири, 10,5 % – в Центральном федеральном округе; меньше всего электромобилей и подключаемых гибридов на Северном Кавказе (0,8 %). На Южный федеральный округ приходится 4,4 %, на Приволжский и Уральский – по 4 %, на Северо-Западный – 3 %. Однако регистрация автотранспорта не всегда соответствует его применению: наибольший пробег электромобилей приходится на Центральный федеральный округ.

По состоянию на 1 июля 2022 г. парк электромобилей (BEV) и подключаемых гибридов (PHEV) в России составил 23,3 тыс. экземпляров, или 0,05 % от всего парка легковых автомобилей (45,42 млн машин). Большая часть электромобилей и подключаемых гибридов используется в Центральном федеральном округе, который, судя

по рис. 1, обладает крайне низким потенциалом использования ВИЭ. В РФ в общем парке электроавтомобилей (BEV) значительную долю (около 69 %) занимает Nissan Leaf, что можно объяснить относительной дешевизной этой машины, особенно на вторичном рынке. На втором месте (доля 13 %) располагаются различные модели Tesla. Доля каждой из остальных марок не превышает 4,5 %. При этом стоит учитывать, что существует множество типов зарядных устройств, различающихся мощностью, уровнем напряжения, разъемом, а следовательно, в настоящее время не существует универсальных зарядных устройств, к которым все электроавтомобили могли бы подключаться без адаптера (например, Nissan Leaf не может использовать зарядные станции для автомобилей Tesla (Superchargers) и наоборот).

Инфраструктура зарядки является ключевым вопросом в связи с внедрением электроавтомобилей, и требуется создание комплексной общенациональной инфраструктуры зарядки до повсеместного внедрения электроавтомобилей. Это особая проблема в контексте России – большой страны с чрезвычайно неоднородным распределением плотности населения (рис. 2), а также значительными вариациями климата. Основная территория расселения в РФ – это 3,8 млн км² (22,3 % площади), на которых живет 125,7 млн чел. (85,9 % населения). Остальные 77,7 % площади характеризуются плотностью населения меньше 6 чел/км². Большие расстояния между городами и необходимость использования кондиционеров или средств обогрева приводят к более быстрой разрядке батареи, поэтому российские водители проявляют беспокойство по поводу возможной дальности поездки. Иными словами, зарядные станции в РФ необходимы на всех основных дорогах.

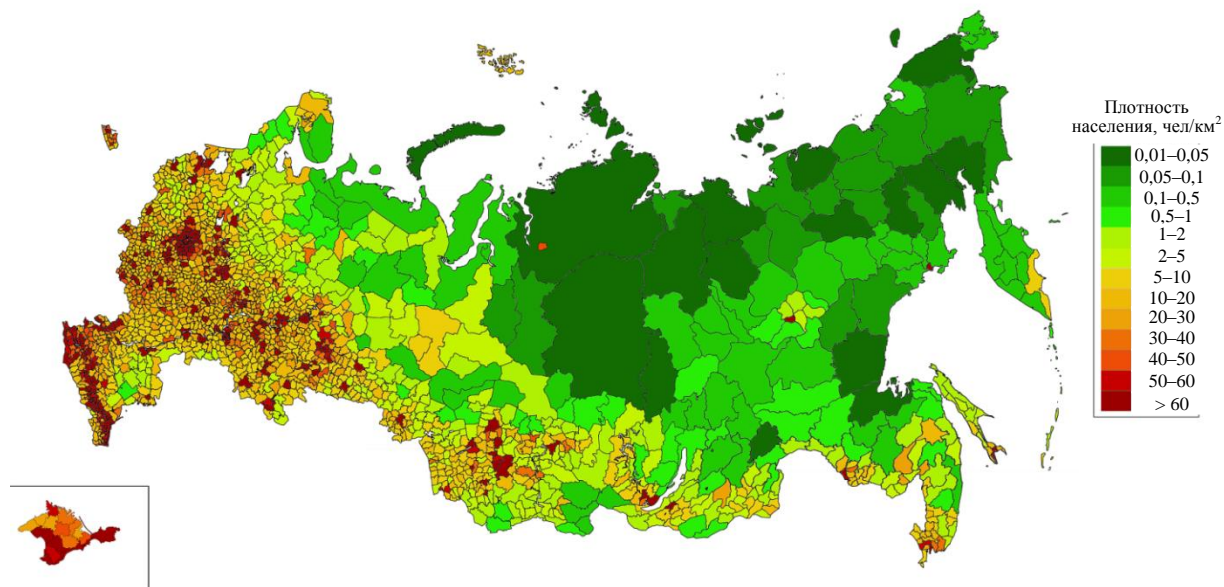


Рис. 2. Распределение плотности населения в РФ [18]

Многочисленные публикации показывают, что отсутствие инфраструктуры прямо влияет на намерения потребителей приобрести электроавтомобиль, а это не просто обуславливает рыночные продажи, но и является серьезным аргументом против распространения электроавтомобилей. Исследования показывают, что ускоренное развитие общественной зарядной инфраструктуры приводит к увеличению продаж указанных машин. Однако на ранних этапах становления рынка электроавтомобилей частные варианты зарядки, такие как зарядка дома или на рабочем месте, также могут оказаться

возможными. В настоящее время лишь небольшое число предприятий имеет возможность установить зарядные станции значительной мощности, поскольку это может быть сопряжено с техническими ограничениями собственных подстанций, а также с необходимостью увеличения лимитов установленной мощности. Многоквартирные дома, как правило, не позволяют организовать зарядку электромобиля, так как требуемая для этого мощность превосходит технические характеристики электропроводки указанного вида жилья. Единственным приемлемым решением становится зарядка в частном доме, но даже в этом случае потребитель сталкивается с необходимостью получения проекта и технических условий на технологическое присоединение.

Отдельным нюансом выступает и то, какое влияние электромобили оказывают непосредственно на электрические сети. Эти транспортные средства потребляют большое количество электроэнергии за короткий промежуток времени из-за нелинейного характера их нагрузок, что может вызвать нестабильность в силовых сетях. Привычки водителя (например, осуществление зарядки в утренние часы перед работой), а также мощности автомобилей, подключенных к одной зарядной станции, обуславливают степень воздействия инфраструктуры зарядки электромобилей на кривую нагрузки сети. Большая часть регионов России, особенно в европейской части, является энергозатратной (в них потребление электроэнергии превышает производство), и широкое внедрение электромобилей может стать дополнительным балластом для перегруженной сети.

Хранение энергии – еще одна проблема, мешающая внедрению электромобилей. Однако отметим, что снижение стоимости тяговых батарей [5] инициировало новые бизнес-модели, позволяющие использовать потенциал электромобилей для указанного хранения. Технология Vehicle-to-grid (V2G) позволяет заряжать электромобили и возвращать накопленную электроэнергию в сеть через подключение к домашней, коммерческой или общественной зарядной станции. Однако применение такой сети в РФ ограничено из-за непроработанности административных и технических вопросов. Аккумуляторы транспортных средств могли бы заряжаться по низкому ночному тарифу, когда спрос в сети низкий и имеется избыточная неиспользованная мощность, а затем частично разряжаются по более высокому тарифу во время пикового спроса, когда в сети не хватает питания, что позволяет владельцам получать прибыль. Однако такая технология показывает свою целесообразность только при «классической» энергетике, базирующейся на сжигании ископаемого топлива. В случае перехода на возобновляемую энергетику (особенно солнечные электростанции с фотоэлектрическими модулями) это потребует установки промежуточных накопителей энергии для того, чтобы запасти энергию днем и выдать ее ночью в электрическую сеть. Кроме того, нужно не только обеспечить необходимые по мощности источники энергии (электрические станции), но и передать выработанную или накопленную энергию к месту потребления, что также создает дополнительную нагрузку на уже сложившуюся систему электроснабжения.

Таким образом, развитие технологии V2G в РФ на данный момент сдерживается инфраструктурой, высоким износом аккумуляторов и низкой осведомленностью потребителей. Можно констатировать, что повсеместное использование аккумуляторов электромобилей в краткосрочной перспективе в масштабах электрической сети для хранения и реализации указанной технологии вряд ли возможно.

Одни из основных проблем, связанных с аккумуляторными электромобилями (BEV), – ограниченная емкость батарей и запас хода, обусловленный этой емкостью. Емкость батареи многих современных моделей ограничивает их дальность пробега (до

300 км). Некоторые новые модели предлагают дальность до 700 км, однако такая дальность рассчитана для положительных температур и по методике производителей. Фактическая же дальность пробега все равно 180–450 км. Стиль вождения также оказывает влияние на расход батарей и дальность хода, но в значительно меньшей степени, чем для автомобилей с двигателем внутреннего сгорания. Таким образом, время, необходимое для зарядки электромобиля, остается одним из наиболее важных факторов. В таблице указаны некоторые из самых распространенных в РФ электромобилей, их номинальный и фактический запас хода, а также время зарядки их аккумуляторов.

Если говорить о времени зарядки, то под домашней зарядкой подразумевается подключение к бытовой электросети мощностью около 2,3 кВт (10 А). Общедоступные зарядные станции с напряжением 220 В и мощностью 11 кВт сокращают время зарядки до 8 ч, что для некоторых водителей приемлемо, но слишком долго при перемещении между городами. В крупных городах встречаются быстрые зарядные станции постоянного тока мощностью 50 кВт; их использование сокращает время заряда до единиц часов. Указанные же в таблице значения для быстрой зарядки достижимы только на станциях мощностью 150–270 кВт и напряжением 480–800 В. Однако на территории Московской области, по данным сервиса «Московский транспорт» на ноябрь 2022 г., зафиксированы только 23 действующих быстрых зарядных станции (с мощностью 120 кВт), а в Тверской области вообще нет ни одной. Принятый 23 августа 2021 г. документ «Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года» предусматривает значительное расширение сети зарядных станций, однако введенные в 2022 г. санкционные ограничения внесли значительные коррективы в эти планы.

Значения показателей для быстрой зарядки в зависимости от модели электродвигателя

Модель электромобиля	Номинальный запас хода, км	Фактический запас хода, км	Время зарядки, ч	
			Домашняя зарядка	Быстрая зарядка
Tesla Model S	603	523	15	0,63
Volkswagen ID.3	547	475	12,25	0,57
Tesla Model 3	547	475	11,75	0,37
BYD Tango	528	400	10,75	0,50
Skoda vision IV	498	442	13,25	0,55
Jaguar I pace	470	415	9	0,92
Audi e-tron	500	408	40	0,83
Porsche Taycan	484	385	43,8	0,5
Nissan Leaf	385	270	9	0,63

Быстрая зарядка – важный вопрос, оказывающий влияние на развитие городской сетевой инфраструктуры. Чем больше энергии требуется для зарядки автомобиля от распределительной сети (напряжением от 380 В до 10 кВ), тем больше нужно установленной мощности электрооборудования сети. Кроме того, эта мощность должна поддерживаться не только местной зарядной станцией, но и кабелями, электрическими трансформаторами, обеспечивающими электроснабжение данных станций. При малопредсказуемой динамике потребления электроэнергии зарядными станциями

требуется избыточное резервирование достаточно больших мощностей трансформаторов, которые при отсутствии зарядки электромобилей будут работать на холостом ходу, приводя к непроизводительным потерям электроэнергии.

Если электромобили заряжаются в одно и то же время бесконтрольно, пиковая нагрузка на сеть может значительно увеличиваться, что вызовет локальную перегрузку распределительной сети [9]. Эта перегрузка требует увеличения пропускной способности. В зависимости от сочетания энергетических систем, типа сети и степени проникновения электромобилей могут возникать различные последствия. Если не использовать интеллектуальное распределение зарядки, влияние на городские распределительные сети может быть значительным и выражаться в увеличении тепловой нагрузки на проводники и трансформаторы; снижении уровня напряжения, асимметрии нагрузки (при применении однофазных зарядных станций); сокращении срока службы трансформаторов; повышенных гармонических искажениях из-за зарядных устройств.

В настоящее время во многих крупных городах в центральных районах организуют платные парковочные места. Городские власти активно участвуют в управлении политикой парковки, включая эксплуатацию счетчиков и сбор платы за уличную парковку. Парковка может служить как важным источником дохода для городов, так и ключевым инструментом политики развития рассматриваемого вида населенных пунктов.

Многие парковочные места на улице расположены в непосредственной близости от городских уличных фонарей и паркоматов, что может рассматриваться как потенциальный источник энергии для зарядки электромобилей. Проблема заключается в малой установленной мощности систем освещения и необходимости прокладки кабелей большего сечения для возможности присоединения парковочных станций мощностью хотя бы 11 кВт (рис. 3). Однако такое размещение может создавать и определенные проблемы для городской инфраструктуры, так как длительная (до 8 ч) парковка электромобиля может послужить потенциальным фактором образования пробок, а также ограничивает доступ других электромобилей. В силу этого даже в крупных городах (например, Москве) наблюдается противоречивая ситуация с установкой зарядных станций [10, 11].



Рис. 3. Городская зарядная станция в Москве [12]

За рубежом в данный момент на уровне политики нацелены на увеличение количества электромобилей. В качестве основной причины их внедрения называют заботу о качестве городского воздуха [12]. Так, в Пекине и Гуанчжоу требуют установки зарядных станций у правительственных зданий и муниципальных парковок. На общественных улицах в таких городах, как названный выше Пекин и Шэньчжэнь, есть зарядные устройства на тротуарах, хотя наиболее распространенной остается зарядка в частных гаражах. В городе Уху (провинция Аньхой) установили требования к общественной зарядке на всей территории города в радиусе 0,9 км и предоставили городскую землю и бордюрное пространство.

В Соединенных Штатах Америки во многих городах предлагают зарядку электромобилей в муниципальных гаражах (аналог перехватывающих парковок в РФ). В феврале 2018 г. в Сиэтле было размещено 156 новых зарядных устройств на единственной парковке в центре города (в настоящее время одна из крупнейших подобных установок в мире). В городе Балтиморе есть зарядные станции для электромобилей в девяти муниципальных гаражах, а также несколько зарядных станций для электромобилей на уличных парковках (места со счетчиками платные, но электричество бесплатное).

Уличные парковки – наиболее удачное решение для городов, особенно в районах, где жители не имеют доступа к домашней зарядке. К таким городам относятся города с уже сформировавшейся многоквартирной застройкой. Строительство зарядных станций большой мощности потребует реконструкции существующих придомовых распределительных подстанций с увеличением мощности трансформаторов, а также перепрокладки линий высоковольтной городской сети электроснабжения, рассчитанной на напряжение 6–20 кВ. Подключение электромобиля для зарядки к электрической сети квартиры сопряжено с превышением предельно допустимой мощности для электропроводки и выходу ее из строя, а также с возрастанием вероятности пожара. Зарядка током 6–10 А, характерным для городских квартир, малоэффективна. Пока не проработан административный регламент разделения ответственности за техническую эксплуатацию устройства, оплаты технологических потерь в самой зарядной станции и на участке от подстанции до зарядной станции, а также взимания платы жильцами при подключении сторонних электромобилей.

Если проанализировать сложившуюся в РФ ситуацию, то можно сделать вывод, что процесс внедрения зарядных станций для электромобилей идет постепенно, однако менее равномерно, чем в Европе (рис. 4). Тем не менее в относительно небольших городах, например Твери, количество таких станций и их доступность значительно ограничены (рис. 5). В таких населенных пунктах использование электромобилей единично и не оказывает значительного воздействия на общее энергопотребление. Однако с ростом количества электромобилей и развитием городской зарядной инфраструктуры потребуются учитывать влияние, оказываемое новыми энергообъектами, на общегородскую электрическую сеть как в плане распределения мощностей, так и на профили электрических нагрузок.



Рис. 4. Распределение зарядных станций по РФ с указанием их типа (зеленый цвет – публичная; оранжевый – высокой мощности; коричневый – с ограничением доступа; голубой – частные) [19]

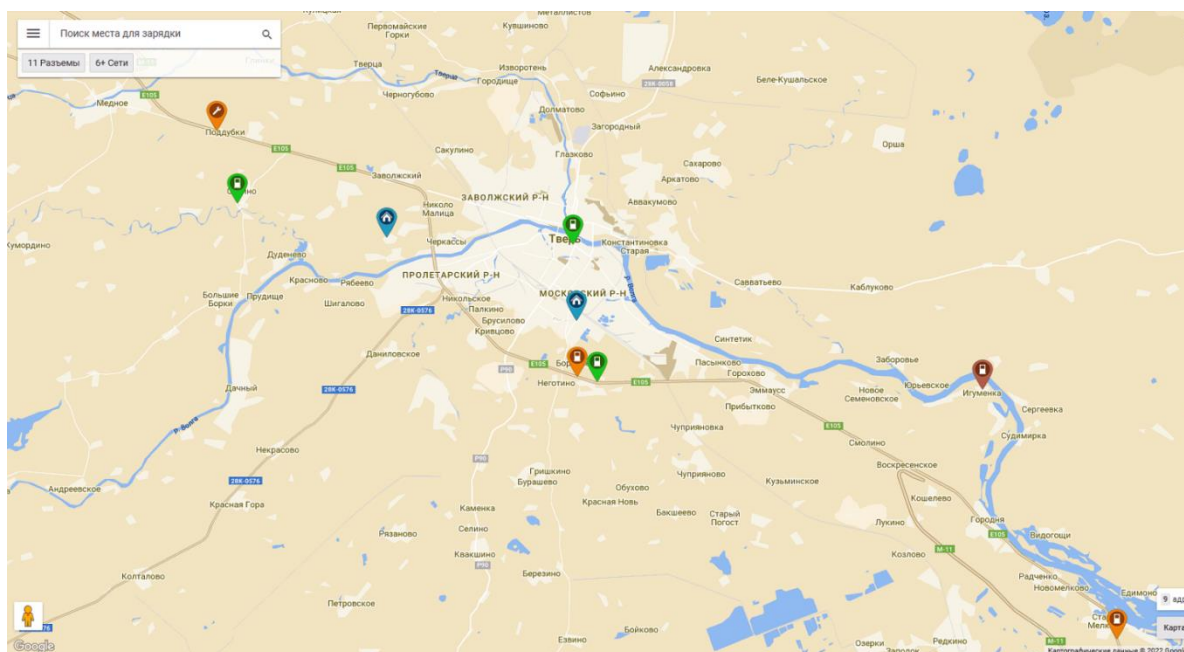


Рис. 5. Информация о имеющихся в наличии зарядных станциях в городе Твери и окрестностях [19]

Таким образом, в настоящий момент при незначительном уровне проникновения электромобилей в городскую инфраструктуру в России их использование (а главное – зарядка) не оказывает решающего воздействия на функционирование сети

электроснабжения городов. Тем не менее с увеличением количества производимых и поставляемых в РФ электромобилей [15] их влиянием на надежность электроснабжения и качество электрической энергии уже нельзя будет пренебрегать. В связи с ограничительными мерами по поставке зарубежной техники и технологий на первое место выходят собственные разработки российских компаний, связанные с внедрением экономичных, энергоэффективных зарядных установок, оказывающих малое воздействие на качество электрической энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективы развития рынка электротранспорта и зарядной инфраструктуры в России: экспертно-аналитический доклад / Д.В. Санатов [и др.]. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2021. 44 с.
2. Лобода В. Только каждый пятый россиянин готов купить электромобиль [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autostat.ru/infographics/52929/> (дата обращения: 22.11.2022).
3. Отчет «Электромобили и автомобили-беспилотники: уже реальность?». М.: Сбербанк Инвестиции, 2022. 48 с.
4. Электрокары и гибриды в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.autostat.ru/file_getters/download/5944/ (дата обращения: 22.11.2022).
5. Конончук М. Дороги назад нет: как Европа решила заглушить бензиновые двигатели [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.autonews.ru/news/6360d5939a7947421cade8d4> (дата обращения: 22.11.2022).
6. Richter F. Rising commodity prices slow EV battery price drop. Dec 14, 2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.statista.com/chart/7713/electric-car-battery-prices/> (дата обращения: 22.11.2022).
7. Wood E., Rames C., Muratori M., Raghavan S., Melaina M. National Plug-In Electric Vehicle Infrastructure Analysis [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/69031.pdf> (дата обращения: 22.11.2022).
8. Lienert P. Exclusive: Automakers to double spending on EVs, batteries to \$1.2 trillion by 2030 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.reuters.com/technology/exclusive-automakers-double-spending-evs-batteries-12-trillion-by-2030-2022-10-21/> (дата обращения: 22.11.2022).
9. Голубев С.В. Возобновляемые источники энергии в энергетике газовой отрасли. Перспективы и аспекты применения ВИЭ на объектах ПАО «Газпром» // *Газовая промышленность*. 2016. № 12 (746). С. 72–78.
10. Powell S., Cezar G.V., Min L. et al. Charging infrastructure access and operation to reduce the grid impacts of deep electric vehicle adoption // *Nat Energy*. 2022. № 7. Pp. 932–945.
11. В России смонтируют до 3 тыс. зарядок для электромобилей к концу 2024 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/16049309> (дата обращения: 22.11.2022).
12. В Москве убирают зарядные станции для электромобилей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mskgazeta.ru/obshchestvo/v-moskve-ubirayut-zaryadnye-stancii-dlya-elektromobilej-5814.html> (дата обращения: 22.11.2022).
13. В одни ворота: почему полный переход на электромобили не спасет экологию [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.m24.ru/articles/ehkologiya/25052022/464628> (дата обращения: 22.11.2022).

14. Корнеев К.Б., Раймонд Осеи-Овусу. Реконфигурация существующей электрической сети населенных пунктов на основе данных о загрузке потребителей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 4 (8). С. 57–65.
15. Маринова С.В. Прогнозирование электропотребления как сфера системного подхода и экспериментальных решений на базе существующих моделей и методов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 3 (11). С. 50–65.
16. Фокин В. Электромобиль в большом городе. Часть 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mobile-review.com/articles/2021/electric-cars.shtml> (дата обращения: 22.11.2022).
17. Эффективность использования ВИЭ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://nirpom.ru/uploads/Новости/2018/june/ris23.jpg> (дата обращения: 22.11.2022).
18. Плотность населения России по муниципальным образованиям [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ea/Плотность_населения_России_по_муниципальным_образованиям.png (дата обращения: 22.11.2022).
19. Карта зарядных станций для электромобилей в России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://plugshare.ru/> (дата обращения: 22.11.2022).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОРНЕЕВ Константин Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: energy-tver@mail.ru

ХРУСТАЛЕВА Мария Сергеевна – магистрант кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: masamasa1487@gmail.com

СИЗОВА Виктория Валентиновна – кандидат психологических наук, доцент, зав. кафедрой иностранных языков, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vicas2005@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Корнеев К.Б., Хрусталева М.С., Сизова В.В. Анализ влияния электромобилей на функционирование электросетевой инфраструктуры города // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 1 (17). С. 42–54.

**ANALYSIS OF THE IMPACT OF ELECTRIC VEHICLES ON THE FUNCTIONING
OF THE POWER GRID INFRASTRUCTURE OF THE CITY**

K.B. Korneev, M.S. Khrustalyova, V.V. Sizova
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. It is indicated that the transition to electric vehicles has made it necessary to significantly reconstruct the power supply network of cities. It is concluded that the presence of high-power charging stations has a huge impact on the schedule of power consumption of cities. The reasons that prevent the introduction of charging stations using renewable energy sources in the Russian Federation are listed. It is noted that the gradual expansion of the electric vehicle fleet will require amendments to regulatory documents regulating the technical, environmental and economic aspects of the functioning of the urban environment.

Keywords: electric car, power supply, load schedule, charging stations, urban infrastructure.

REFERENCES

1. Perspektivy razvitiya elektrotransporta I zaryadnoy infrastruktury v Rossii: ekspertno-analiticheskiy doklad [Prospects for the development of the market for electric transport and charging infrastructure in Russia: expert and analytical report] / D.V. Sanatov [et al.]. St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2021. 44 p.
2. Loboda V. Only every fifth Russian is ready to buy an electric car [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.autostat.ru/infographics/52929/> (date of access: 22.11.2022). (In Russian).
3. Otchet «Elektromobily I avtomobily-bespilotniki: uzhe realnost'?» [Report: «Electric vehicles and self-driving cars: already a reality?»]. Moscow: Sberbank Investments, 2022. 48 p.
4. Electric cars and hybrids in Russia [Electronic resource]. – Access mode: https://www.autostat.ru/file_getters/download/5944/ (date of access: 22.11.2022). (In Russian).
5. Kononchuk M. There is no turning back: How Europe decided to stop gasoline engines [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.autonews.ru/news/6360d5939a7947421cad8d4> (date of access: 22.11.2022). (In Russian).
6. Richter F. Rising commodity prices slow EV battery price drop [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.statista.com/chart/7713/electric-car-battery-prices/> (date of access: 22.11.2022).
7. Wood E., Rames C., Muratori M., Raghavan S., Melaina M. National plug-in electric vehicle infrastructure analysis [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/69031.pdf> (date of access: 22.11.2022).
8. Lienert P. Exclusive: Automakers to double spending on EVs, batteries to \$1.2 trillion by [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.reuters.com/technology/exclusive-automakers-double-spending-evs-batteries-12-trillion-by-2030-2022-10-21/> (date of access: 22.11.2022).
9. Golubev S.V. Renewable energy sources in the energy sector of the gas industry. Prospects and aspects of the use of renewable energy at the facilities of PJSC Gazprom. *Gas industry*. 2016. No. 12 (746), pp. 72–78. (In Russian).
10. Powell S., Cezar G.V., Min L. et al. Charging infrastructure access and operation to reduce the grid impacts of deep electric vehicle adoption. *Nat Energy*. 2022. No. 7, pp. 932–945.

11. Up to 3,000 electric car chargers will be installed in Russia by the end of 2024 [Electronic resource]. – Access mode: <https://tass.ru/ekonomika/16049309> (date of access: 22.11.2022). (In Russian).
12. Charging stations for electric vehicles are being removed in Moscow [Electronic resource]. – Access mode: <https://mskgazeta.ru/obshchestvo/v-moskve-ubirayut-zaryadnye-stancii-dlya-elektromobilej-5814.html> (date of access: 22.11.2022). (In Russian).
13. One way: why a full transition to electric vehicles will not save the environment [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.m24.ru/articles/ehkologiya/25052022/464628> (date of access: 22.11.2022). (In Russian).
14. Korneev K.B., Raymond Osei-Owusu. Reconfiguration of the existing electrical network of settlements on the basis of data on the load of consumers. *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Construction. Electrical engineering and chemical technologies»*. 2020. No. 4 (8), pp. 57–65. (In Russian).
15. Marinova S.V. Forecasting of power consumption as a sphere of systemic approach and experimental solutions based on existing models and methods. *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Construction. Electrical engineering and chemical technologies»*. 2021. No. 3 (11), pp. 50–65. (In Russian).
16. Fokin V. Electric car in a big city. Part 1 [Electronic resource]. – Access mode: <https://mobile-review.com/articles/2021/electric-cars.shtml> (date of access: 22.11.2022). (In Russian).
17. Efficiency of RES use [Electronic resource]. – Access mode: <https://nipom.ru/uploads/Новости/2018/june/ris23.jpg> (date of access: 11.22.2022). (In Russian).
18. Population density of Russia by municipalities [Electronic resource]. – Access mode: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ea/Плотность_населения_России_по_муниципальным_образованиям.png (date of access: 11.22.2022). (In Russian).
19. Map of charging stations for electric vehicles in Russia [Electronic resource]. – Access mode: <https://plugshare.ru/> (date of access: 11.22.2022). (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KORNEEV Konstantin Borisovich – candidate of technical sciences, associate professor of the department of power supply and electrical engineering, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: energy-tver@mail.ru

KHRUSTALYOVA Maria Sergeevna – master's student, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: masamasa1487@gmail.com

SIZOVA Victoria Valentinovna – candidate of psychological sciences, associate professor, head of the department of foreign languages, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vicas2005@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Korneev K.B., Khrustalyova M.S., Sizova V.V. Analysis of the impact of electric vehicles on the functioning of the power grid infrastructure of the city // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2023. No. 1 (17), pp. 42–54.

УДК 629.1.04

ВЛИЯНИЕ СЕТИ НА РЕАКТИВНУЮ МОЩНОСТЬ*И.П. Попов**Курганский государственный университет (г. Курган)*

© Попов И.П., 2023

Аннотация. Изложены результаты оценки влияния каскада трансформаторов на реактивную мощность в сети при симметричной нагрузке. Представлен ряд важных выводов: в рассмотренной схеме при симметричной нагрузке происходит самокомпенсация реактивной мощности; если трансформаторы идентичны, то поток реактивной мощности от нагрузки делится между ними на равные части; поток реактивной мощности на внешнем участке в три раза меньше, чем на внутреннем. Указано, что в реальной сети из-за вышеперечисленных обстоятельств поток реактивной мощности по мере удаления от нагрузки существенно уменьшается с увеличением числа трансформаторных подстанций.

Ключевые слова: осциллятор, энергия, колебания, реактивная мощность, фаза, каскад, трансформатор, сеть, симметричная нагрузка.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-55-60**ВВЕДЕНИЕ**

Реактивная мощность в сети является нежелательным явлением. Ее циркуляция по проводам вызывает тепловые потери, равные приблизительно 10 % ее величины. Для ее снижения используют дорогостоящие статические и динамические компенсаторы.

Цель работы – установление явления сокращения потока реактивной мощности в сети с трансформаторами.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Самокомпенсация реактивной мощности при симметричной нагрузке. На рис. 1 представлена идеальная схема подключения вторичных обмоток трансформатора к симметричной индуктивной нагрузке. Сопротивления рассеяния не показаны [1–4]. Активные составляющие сопротивлений не рассматриваются. Реактивная мощность в сеть не передается (гипотетически).

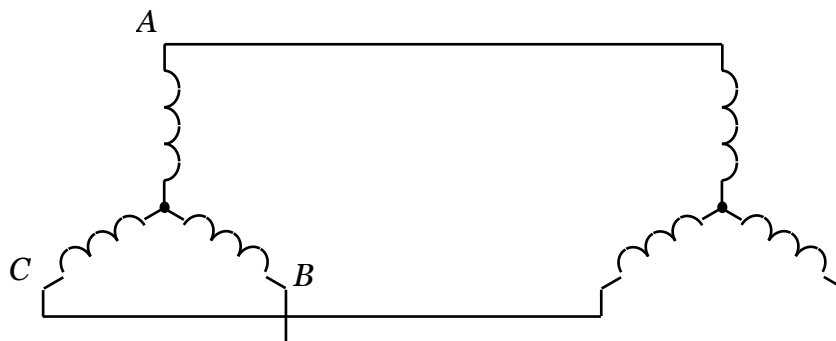


Рис. 1. Самокомпенсация реактивной мощности

В части опосредованного взаимодействия магнитного поля с нагрузкой схема неотличима от комплекса, в котором вместо трансформатора использована синхронная явнополюсная машина [5–6]; в этом комплексе источником возбуждения колебаний тока (индуктивного) в любой фазе являются другие (другая) фазы (фаза) нагрузки [7–9].

Подобное явление самокомпенсации реактивной мощности известно и в механических системах [10–12].

Мгновенные токи i_A, i_B, i_C напряжения u_A, u_B, u_C и мощности (реактивные) q_A, q_B, q_C фаз:

$$\begin{aligned}i_A &= I_m \sin \omega t; \\u_A &= I_m \omega L \cos \omega t; \\q_A &= I_m^2 \omega L \sin \omega t \cos \omega t = 0,5 I_m^2 \omega L \sin 2\omega t; \\i_B &= I_m \sin(\omega t - 2\pi/3); \\u_B &= I_m \omega L \cos(\omega t - 2\pi/3); \\q_B &= 0,5 I_m^2 \omega L \sin(2\omega t - 4\pi/3); \\&= I_m \sin(\omega t + 2\pi/3); \\u_C &= I_m \omega L \cos(\omega t + 2\pi/3); \\q_C &= 0,5 I_m^2 \omega L \sin(2\omega t + 4\pi/3),\end{aligned}$$

где L – суммарная индуктивность фазы трансформатора (включая рассеяние) и нагрузки; I_m – амплитуда тока; ω – частота; t – время.

Сумма мощностей фаз B и C

$$\begin{aligned}q_{BC} &= q_B + q_C = \\&= 0,5 I_m^2 \omega L \sin(2\omega t - 4\pi/3) + 0,5 I_m^2 \omega L \sin(2\omega t + 4\pi/3) = \\&= 2 \cdot 0,5 I_m^2 \omega L \sin[(2\omega t - 4\pi/3 + 2\omega t + 4\pi/3)/2] \cos[(2\omega t - 4\pi/3 - 2\omega t - 4\pi/3)/2] = \\&= I_m^2 \omega L \sin 2\omega t \cos(-4\pi/3) = \\&= -0,5 I_m^2 \omega L \sin 2\omega t.\end{aligned}$$

Полученная величина противоположна мощности фазы A :

$$q_B + q_C = -q_A.$$

Это означает, что при оговоренных условиях фазы нагрузки совершают между собой обмен реактивной энергией. Следовательно, имеет место самонейтрализация реактивного характера нагрузки.

Замечание о мощностях фаз. Может показаться, что соотношение $q_B + q_C = -q_A$ тривиально и обусловлено симметрией трехфазной схемы. Из аналогичных соотношений для мгновенной мощности p_A, p_B, p_C при идеально активной нагрузке видно, что это не так. Действительно:

$$\begin{aligned}p_A &= I_m^2 R \cos^2 \omega t = \\&= 0,5 I_m^2 R (1 + \cos 2\omega t) = \\&= 0,5 I_m^2 R + 0,5 I_m^2 R \cos 2\omega t; \\p_B &= 0,5 I_m^2 R + 0,5 I_m^2 R \cos(2\omega t - 4\pi/3); \\p_C &= 0,5 I_m^2 R + 0,5 I_m^2 R \cos(2\omega t + 4\pi/3); \\p_B + p_C &= 0,5 I_m^2 R + 0,5 I_m^2 R \cos(2\omega t - 4\pi/3) + 0,5 I_m^2 R + 0,5 I_m^2 R \cos(2\omega t + 4\pi/3) = \\&= I_m^2 R + 0,5 I_m^2 R [\cos 2\omega t \cos(4\pi/3) + \sin 2\omega t \sin(4\pi/3)] + \\&\quad + 0,5 I_m^2 R [\cos 2\omega t \cos(4\pi/3) - \sin 2\omega t \sin(4\pi/3)] = \\&= I_m^2 R - 0,5 I_m^2 R \cdot 0,5 \cos 2\omega t - 0,5 I_m^2 R \cdot 0,5 \cos 2\omega t = \\&= I_m^2 R - 0,5 I_m^2 R \cos 2\omega t; \\p_B + p_C &\neq -p_A.\end{aligned}$$

Потоки реактивной мощности в последовательности трансформаторов. На рис. 2 показан ряд трансформаторов или шунтирующих реакторов с реактивной нагрузкой. Идеализация этой схемы меньше, чем первой, поскольку реактивная мощность второго и третьего трансформаторов передается в первичную обмотку.

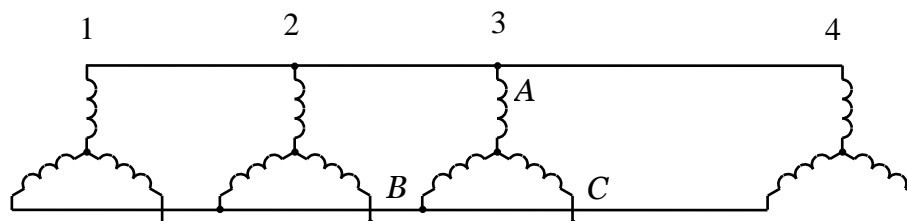


Рис. 2. Ряд трансформаторов: 1–4 – номера участков

Если трансформаторы идентичны, то поток реактивной мощности от нагрузки делится между ними на равные части, поэтому поток реактивной мощности на внешнем участке в три раза меньше, чем на внутреннем. В соответствии с этим в реальной сети с ростом числа трансформаторных подстанций поток реактивной мощности по мере удаления от нагрузки существенно уменьшается.

Значения потоков реактивной мощности в участках сети, отнесенные к величине потока через нагрузку, представлены ниже:

Участок сети	1–2	2–3	3–4
Относительный поток реактивной мощности	1/3	2/3	1

До сих пор считалось, что реактивная мощность не перетекает между фазами, поэтому ее поток *без изменения* циркулирует между нагрузкой и источником (генератором) (при условии отсутствия средств компенсации).

Согласно рис. 2 поток на участке 3–4 остался без изменений по сравнению с прежними воззрениями. Однако уже на участке 2–3 он составляет 2/3 от его значения для нагрузки, а на участке 1–2 – 1/3.

Каждый последующий трансформатор по мере удаления от нагрузки *шунтирует* часть потока реактивной мощности, поэтому в источнике (генераторе) реактивная мощность существенно меньше, чем в нагрузке. Соответственно уменьшается усредненный поток реактивной мощности, циркулирующий в сети.

Поскольку снижение усредненного потока реактивной мощности происходит без применения специальных средств компенсации, то это явление можно считать самокомпенсацией реактивной мощности. В качестве технических средств, обеспечивающих такой реактивный энергообмен, могут выступать *уже имеющиеся* в сети трансформаторы и шунтирующие реакторы. В этом смысле достигаемое таким образом снижение потока реактивной мощности является *естественным*, т.е. не специально организованным, как в случае с синхронными компенсаторами и конденсаторами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ориентируясь на изложенные выше соображения, можно сделать вывод, что имеет место явление сокращения потока реактивной мощности в сети с трансформаторами. Полученные аналитические выражения и сделанные выводы не накладывают ограничений на классы напряжения силовых трансформаторов и типы электроэнергетических систем, электрических сетей, в которых они размещаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Popov I.P. Methods for determining the scattering reactance of transformer windings // *Russian Electrical Engineering*. 2021. Vol. 92. № 1. Pp. 46–49.
2. Попов И.П. Рассеяние магнитного потока в трансформаторах // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 4 (8). С. 81–88.
3. Павлов В.Д. Математическая модель высокоточного метода холостого хода определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности // *Автоматизированные технологии и производства*. 2021. № 2 (24). С. 11–13.
4. Павлов В.Д. Математическая модель высокоточного метода короткого замыкания для определения рассеяния обмоток трансформатора по отдельности // *Автоматизированные технологии и производства*. 2022. № 1 (25). С. 14–16.
5. Попов И.П. Теоретически установленная независимость амплитуд тока и момента синхронной машины с индуктивной нагрузкой от частоты // *Вестник МЭИ*. 2019. № 5. С. 68–72.
6. Попов И.П. Амплитудно-частотные особенности режимов нагрузки синхронной электрической машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 49–56.
7. Попов И.П. Трииндуктивный осциллятор // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 1 (13). С. 50–55.
8. Попов И.П., Попов Д.П., Кубарева С.Ю. Индуктивно-индуктивная колебательная система // *Вестник Курганского государственного университета. Технические науки*. 2013. Вып. 8. № 2 (29). С. 78–79.
9. Попов И.П., Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф. Емкостно-емкостная колебательная система // *Вестник Курганского государственного университета. Технические науки*. 2014. Вып. 9. № 2 (33). С. 21–23.
10. Попов И.П. Теория мультиинертного осциллятора // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2020. № 1. С. 88–91.
11. Попов И.П. Свободные гармонические колебания без использования потенциальной энергии // *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России*. 2022. № 4 (156). С. 9–12.
12. Попов И.П. Двухмассовый осциллятор // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2022. № 12. С. 558–560.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ПОПОВ Игорь Павлович – старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», 640020, Россия, г. Курган, ул. Советская, д. 63/4. E-mail: ip.porow@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Попов И.П. Влияние сети на реактивную мощность // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 1 (17). С. 55–60.

NETWORK INFLUENCE ON REACTIVE POWER

I.P. Popov

Kurgan State University (Kurgan)

Abstract. The results of the evaluation of the influence of the transformer cascade on the reactive power in the network under symmetrical load are presented. A number of important conclusions are presented: in the considered scheme, with a symmetrical load, reactive power self-compensates; if the transformers are identical, then the reactive power flow from the load is divided between them into equal parts; the reactive power flow in the external section is three times less than in the internal one. It is indicated that in a real network, due to the above circumstances, the reactive power flow decreases significantly with an increase in the number of transformer substations as it moves away from the load.

Keywords: oscillator, energy, oscillations, reactive power, phase, cascade, transformer, network, symmetrical load.

REFERENCES

1. Popov I.P. Amplitude-frequency features of load modes of a synchronous electric machine. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskiye tekhnologii»*. 2020. № 2 (6), pp. 49–56. (In Russian).
2. Popov I.P. Methods for determining the scattering reactance of transformer windings. *Russian Electrical Engineering*. 2021. Vol. 92. No. 1, pp. 46–49. (In Russian).
3. Popov I.P. Flux leakage in transformers. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskiye tekhnologii»*. 2020. No. 4 (8), pp. 81–88. (In Russian).
4. Pavlov V.D. Mathematical model of a high-precision method of idling for determining the scattering of transformer windings separately. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva*. 2021. No. 2 (24), pp. 11–13. (In Russian).
5. Pavlov V.D. Mathematical model of a high-precision short circuit method for determining the scattering of transformer windings separately. *Avtomatizirovannyye tekhnologii i proizvodstva*. 2022. No. 1 (25), pp. 14–16. (In Russian).

6. Popov I.P. Theoretically established independence of the amplitudes of the current and torque of a synchronous machine with an inductive load on frequency. *Vestnik MEI*. 2019. No. 5, pp. 68–72. (In Russian).
7. Popov I.P. Amplitude-frequency features of load modes of a synchronous electric machine. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskiye tekhnologii»*. 2020. No. 2 (6), pp. 49–56. (In Russian).
8. Popov I.P. Triinductive oscillator. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskiye tekhnologii»*. 2022. No. 1 (13), pp. 50–55. (In Russian).
9. Popov I.P., Popov D.P., Kubareva S.Yu. Inductive-inductive oscillatory system. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2013. Iss. 8. No. 2 (29), pp. 78–79. (In Russian).
10. Popov I.P., Sarapulov F.N., Sarapulov S.F. Capacitive-capacitive oscillatory system. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2014. Iss. 9. No. 2 (33), pp. 21–23. (In Russian).
11. Popov I.P. Theory of a multi-inert oscillator. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*. 2020. No. 1, pp. 88–91. (In Russian).
12. Popov I.P. Free harmonic oscillations without the use of potential energy. *Oboronnyy kompleks – nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*. 2022. No. 4 (156), pp. 9–12. (In Russian).
13. Popov I.P. Two-mass oscillator. *Sborka v mashinostroyenii, priborostroyenii*. 2022. No. 12, pp. 558–560. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

POPOV Igor Pavlovich – senior lecturer of the department of technology of mechanical engineering, machine tools and instruments, FSBEI HE «Kurgan State University», 63/4, Sovetskaja St., Kurgan, 640020, Russia. E-mail: ip.popow@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Popov I.P. Network influence on reactive power // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2023. No. 1 (17), pp. 55–60.

УДК 621.316.726

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ОХЛАЖДЕНИЕМ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА***Д.А. Прокофьев, В.В. Окунева, К.Б. Корнеев**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Прокофьев Д.А., Окунева В.В.,
Корнеев К.Б., 2023

Аннотация. Описаны факторы, приводящие к неэффективной работе систем охлаждения трансформаторов, в частности автотрансформаторов. Перечислены восемь типов систем охлаждения, которые применяются в зависимости от мощности трансформатора, возникающих при его работе потерь мощности. Дан общий вид системы охлаждения трансформатора типа ДЦ. Указаны последствия, к которым приводит поддержание низких температур масла с учетом характерной загрузки трансформаторов. Сделан вывод, что внедрение программно-технических комплексов управления системой охлаждения с применением электронно-коммутируемых двигателей даст возможность увеличить эффективность охлаждения, ресурс трансформаторов, уменьшить энергопотребление, а следовательно, снизить экономические расходы на его обслуживание.

Ключевые слова: система охлаждения, автоматическое управление охлаждением, энергоэффективность подстанций, электронно-коммутируемые двигатели, программно-технический комплекс.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-61-69

Анализ трансформаторного парка ПАО «Россети ФСК ЕЭС» показывает, что лишь у 15 % от общего числа трансформаторов есть современные системы управления охлаждением трансформаторов. Основная масса эксплуатируемых шкафов автоматики охлаждения трансформаторов (ШАОТ) относится к устаревшим модификациям (системы охлаждения типа Д и ДЦ), что приводит к повышенному расходу электроэнергии по данной составляющей структуры собственных нужд подстанций.

Потребление электроэнергии на охлаждение трансформаторов и автотрансформаторов характеризуется:

- значительной унификацией оборудования систем охлаждения;
- устаревшей элементной базой ШАОТ;
- доступом персонала подстанций к настройкам ШАОТ и отсутствием технической возможности мониторинга фактически потребляемой электроэнергии;
- зависимостью режимов работы системы охлаждения от загрузки трансформатора и температуры окружающего воздуха;
- избыточностью установленных мощностей охладителей;
- управлением режимами работы системы охлаждения без учета фактического состояния трансформатора.

Указанные факторы приводят к неэффективной работе систем охлаждения трансформаторов, в частности автотрансформаторов, что выражается в повышенном потреблении электроэнергии из-за избыточного охлаждения масла в системе.

Нормативные документы выделяют восемь типов систем охлаждения (таблица), которые применяются в зависимости от мощности трансформатора и возникающих при его работе потерь мощности.

Типы систем охлаждения маслонаполненных трансформаторов

Циркуляция масла	Охлаждение масла	Обозначение системы охлаждения	
		по ГОСТ	по МЭК
Естественная	Естественное воздушное	М	ONAN
	Принудительное воздушное	Д	ONAF
	Принудительное водяное	МВ	ONWF
Принудительная	Естественное воздушное	МЦ	OFAN
	Принудительное воздушное	ДЦ	OFAF
	Принудительное водяное	Ц	OFWF
Принудительная направленная	Принудительное воздушное	НДЦ	ODAF
	Принудительное водяное	НЦ	ODWF

На подстанциях ПАО «Россети ФСК ЕЭС» используются системы охлаждения типов М, Д, ДЦ и М/Д/ДЦ [1]. Как видно из диаграммы (рис. 1), наиболее энергоемки системы охлаждения типа ДЦ.

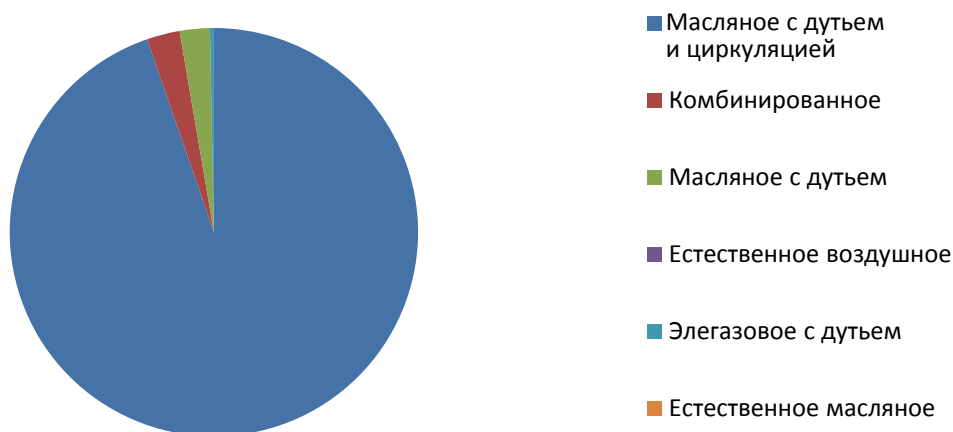


Рис. 1. Потребление электроэнергии различными типами систем охлаждения трансформаторов

Комбинированные системы охлаждения типа М/Д/ДЦ являются энергоэффективными в достаточной степени, а системы охлаждения типа Д имеют малую мощность установленных электродвигателей вентиляторов.

Система охлаждения трансформаторов и автотрансформаторов типа ДЦ характерна для подстанций ПАО «РОССЕТИ ФСК ЕЭС» (рис. 2); применяется для трансформаторов, в частности автотрансформаторов, у которых выделяющиеся потери настолько значительны, что для их отвода приходится использовать специальные масляно-воздушные охладители, обдуваемые вентиляторами и оснащенные насосами для принудительной циркуляции масла. Благодаря такой циркуляции достигается более равномерное распределение температуры масла по высоте бака.

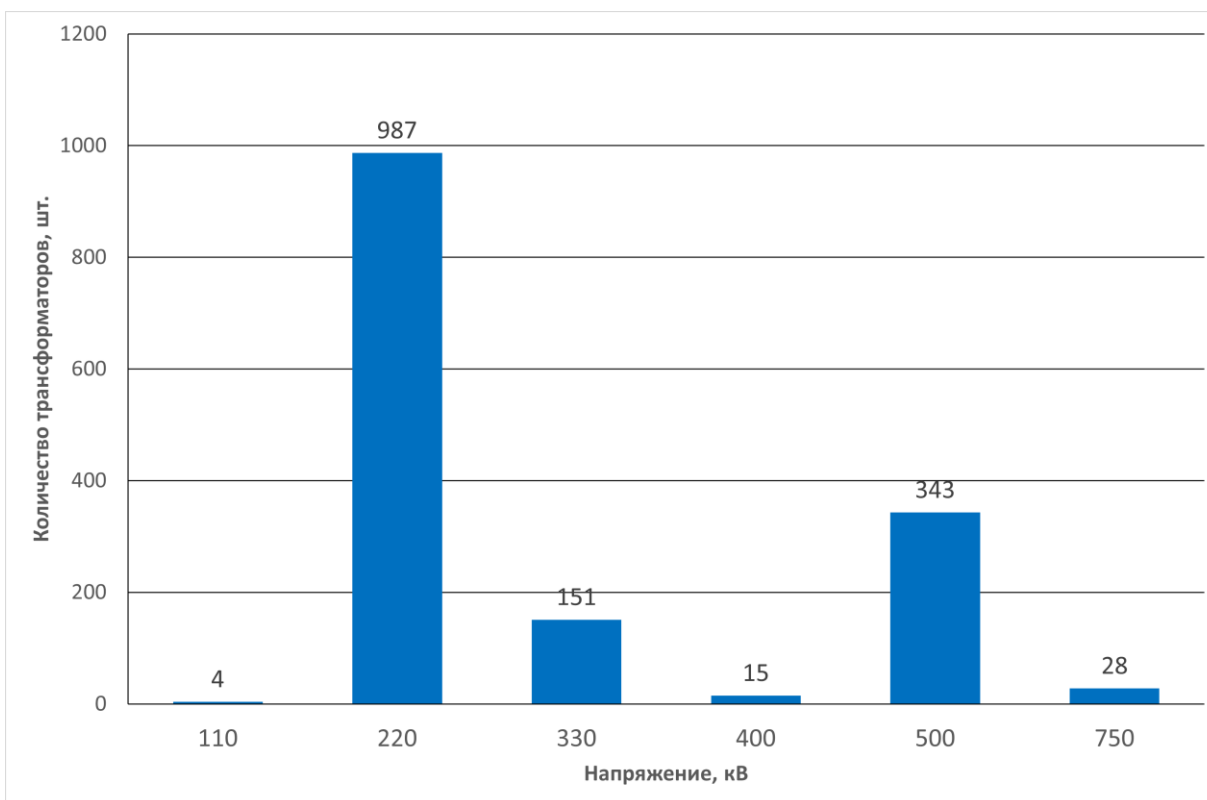


Рис. 2. Количество силовых трансформаторов, в частности автотрансформаторов, ПАО «РОССЕТИ ФСК ЕЭС» с системой охлаждения типа ДЦ в зависимости от напряжения

На подстанциях ПАО «РОССЕТИ ФСК ЕЭС» эксплуатируют 1 528 трансформаторов, в частности автотрансформаторов, напряжением от 110 до 750 кВ с системой охлаждения типа ДЦ [2].

Системы охлаждения типа ДЦ для трансформаторов, в частности автотрансформаторов, с различной установленной мощностью и рабочим напряжением имеют одинаковую конструкцию: масляный насос и теплообменник масло – воздух с принудительной циркуляцией воздуха, осуществляемой двумя вентиляторами (рис. 3). Охладители ДЦ имеют теплосъем 160–180 кВт и устанавливаются на трансформаторы в количестве, достаточном для обеспечения удаления излишков выделяющегося в трансформаторе тепла, обусловленных потерями «в стали» и «в меди».



Рис. 3. Общий вид системы охлаждения трансформатора типа ДЦ

Около 45 % трансформаторов, в частности автотрансформаторов, с системой охлаждения типа ДЦ оснащено четырьмя блоками охладителей. От двух до шести блоков установлено на 90 % трансформаторов с указанной системой охлаждения (рис. 4).

По причине значительной единичной мощности блоков-охладителей эффективность системы охлаждения меняется дискретно и сильно падает при низкой нагрузке трансформатора. Кроме того, при малых нагрузках трансформатора энергоэффективность системы охлаждения типа ДЦ ухудшается из-за постоянно работающих маслонасосов.

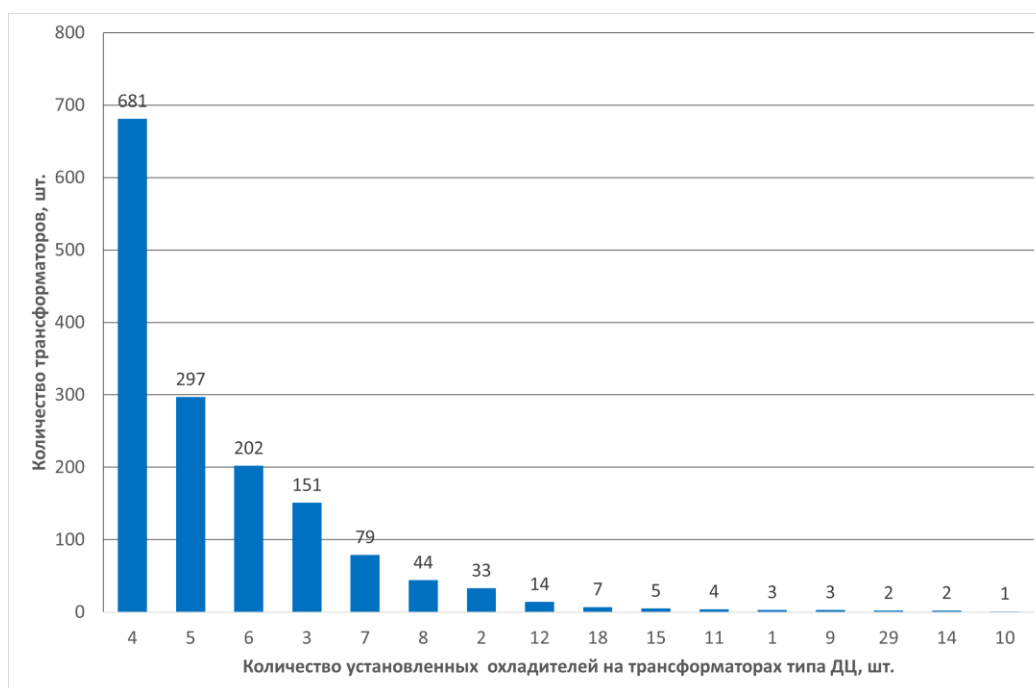


Рис. 4. Количество трансформаторов, в частности автотрансформаторов, ПАО «РОССЕТИ ФСК ЕЭС» по количеству установленных блоков охладителей

По данным анализа энергоаудита за 2022 г. [2], около 80 % трансформаторов имеют среднегодовую загрузку не более 40 % и менее 1–2 % – температуру наиболее нагретой точки выше 98 °С.

Поддержание низких температур масла с учетом характерной загрузки трансформаторов ПАО «РОССЕТИ ФСК ЕЭС» приводит к некоторым последствиям:

медленному старению изоляции (расчетный срок ее службы превышает срок службы остальных элементов конструкции трансформатора);

значительному расходу электроэнергии на охлаждение трансформатора, не приводящему к повышению надежности работы оборудования;

усиленному износу электродвигателей маслонасосов и вентиляторов и необходимости в их более частой замене.

В таких условиях увеличение энергоэффективности работы системы охлаждения может быть достигнуто через сдвиг уставок включения в зоны больших температур с учетом фактических режимов работы трансформаторов [3].

Системы охлаждения трансформаторов, в частности автотрансформаторов, типа ДЦ, имеющие потенциал повышения энергоэффективности, управляются ШАОТ.

Более чем на 80 % трансформаторов применяют устаревшие ШАОТ (рис. 5), не позволяющие гибко управлять электродвигателями систем охлаждения. Логика управления системами охлаждения различна для каждого трансформатора (и, следовательно, автотрансформатора). Такие шкафы могут обеспечивать каскадное включение охладителей поблочно. Другой вариант – производится включение всех маслонасосов системы охлаждения (за исключением резервного) при постановке трансформатора, в частности автотрансформатора, «под напряжение» с подключением необходимого количества пар вентиляторов в зависимости от условий работы трансформатора. В качестве входных данных для управления системами охлаждения могут использоваться сигналы термореле низкой точности, а также косвенные расчеты наиболее нагретой точки обмотки трансформатора (автотрансформатора) на основании данных о его нагрузке. Такие алгоритмы управления системами охлаждения трансформаторов (автотрансформаторов), использование приборов низкой точности и косвенных расчетов не обеспечивают оптимальных температурных режимов их работы систем охлаждения.

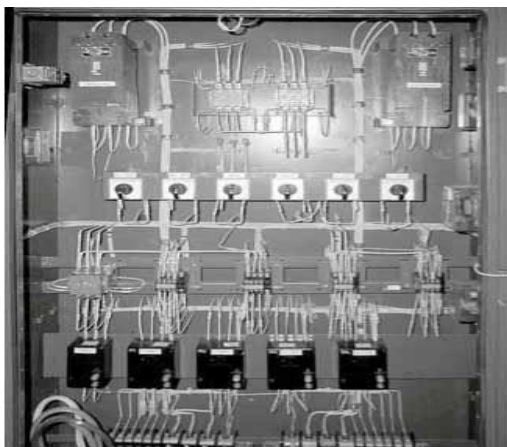


Рис. 5. Типовое исполнение ШАОТ

Анализ эксплуатируемого трансформаторного парка ПАО «РОССЕТИ ФСК ЕЭС» позволяет сделать выводы:

1. Для более чем 75 % трансформаторного парка срок эксплуатации составляет 15 лет и более; такие трансформаторы, в частности автотрансформаторы, оснащены устаревшими, неэффективными системами управления охлаждением.

2. Наибольший вклад в потребление электроэнергии на охлаждение трансформаторов (автотрансформаторов) вносят системы охлаждения типа ДЦ, потребляющие более 90 % электроэнергии, поглощаемой системами охлаждения трансформаторов.

3. Основным потребителем электроэнергии являются системы охлаждения типа ДЦ (около 90 % потребляемой системами охлаждения энергии).

4. 90 % трансформаторов, оснащенных системой охлаждения типа ДЦ, включают в свой состав от двух до шести блоков охладителей.

5. Электродвигатели, применяемые в приводах элементов систем охлаждения типа ДЦ, имеют типовую электрическую мощность. Приводы маслонасосов – 4 кВт, приводы вентиляторов – 3 кВт [4].

Имеющаяся информация об алгоритмах работы, количестве и мощностях электродвигателей приводов систем охлаждения дает основания говорить о возможности и экономической целесообразности создания типовых решений для повышения энергоэффективности систем охлаждения, установленных на трансформаторах (в частности, автотрансформаторах). В качестве примера таких решений рассмотрим проект программно-технического комплекса управления системой охлаждения с применением электронно-коммутируемых двигателей (рис. 6). Данный вариант исполнения должен состоять из ряда блоков. Опишем их.

Блок электронно-коммутируемых двигателей – это электронно-коммутируемые двигатели с возможностью регулирования скорости вращения вала в зависимости от заданного алгоритма.

Блок контроля и связи комплектуется электроконтактным манометром и реле перепадов давления для увеличения эффективности работы системы охлаждения, блок опционален. Такой блок должен осуществлять совместную работу двух и более электронно-коммутируемых двигателей, обеспечивать их связь с блоком управления, а также предоставлять возможность подключения к существующей сети автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП).

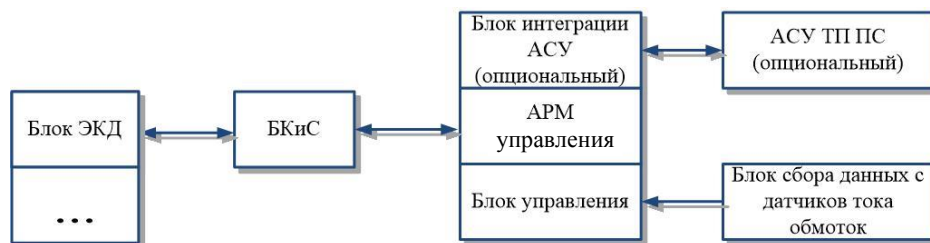


Рис. 6. Структурная схема программно-технического комплекса управления системой охлаждения с применением электронно-коммутируемых двигателей: ЭКД – электронно-коммутируемые двигатели; БКиС – блок контроля и связи; АРМ – автоматизированное рабочее место; ПС – подстанция

Датчики температуры передают температуру верхних слоев масла на блоке контроля и связи или в зависимости от комплектации. Эти датчики предназначены также для регулирования скорости вращения двигателями.

Электроконтактный манометр необходимо использовать для получения данных о состоянии работы маслонасосов трансформатора (при отключенном маслонасосе на охладителе ДЦ нет смысла включать вентиляторы).

Использование реле перепадов давления позволит получать информацию о необходимости прочистки радиатора. Данное реле не является обязательным в комплекте поставки и устанавливается при наличии технико-экономического обоснования его необходимости.

Блок сбора данных с датчиков тока обмоток предназначен для сбора данных с цифровых амперметров или с оптических датчиков измерения температур.

Блок интеграции с АСУ ТП обеспечивает передачу информации о работе системы охлаждения в АСУ ТП для отображения на мнемосхемах. Блок интеграции с АСУ ТП добавляется в конструкцию опционально.

Автоматизированное рабочее место управления обеспечивает местное управление режимами работы системы охлаждения, а также отображение ее состояния в целом, отдельных блоков и текущих режимов работы.

Блок управления осуществляет сбор сигналов с необходимых датчиков и реализацию алгоритма управления охладителями. Блок управления оборудован модулями ввода для дополнительных контактов.

В заключение отметим, что внедрение программно-технических комплексов управления системой охлаждения с применением электронно-коммутируемых двигателей позволит увеличить эффективность охлаждения, ресурс трансформаторов, уменьшить энергопотребление, а следовательно, снизить экономические расходы на его обслуживание. Всему этому также будет способствовать реализация комплексных мер по достижению эффективного и рационального охлаждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Положение «О единой технической политике в электросетевом комплексе» (новая редакция). Утверждено решением Совета директоров ПАО «ФСК ЕЭС» (протокол от 09.04.2020 № 496). Москва. 2020. 187 с.
2. Объем свободной трансформаторной мощности // Раскрытие информации в соответствии с постановлением Правительства РФ от 21.01.2004 № 24. ПАО «Россети ФСК ЕЭС». URL: https://www.fsk-ees.ru/consumers/disclosures_in_accordance_with_government_decree_of_21_01_2004_24/obem_svobodnoy_transformatornoy_moshchnosti/ (дата обращения: 10.10.2022).
3. Русин А.Ю. Сокращение времени испытаний электрооборудования на надежность. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 3 (7). С. 60–68.
4. СТО 56947007-29.180.01.116-2012 (с изменениями от 13.10.2014) Инструкция по эксплуатации трансформаторов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПРОКОФЬЕВ Денис Александрович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: prokofeae@mail.ru

ОКУНЕВА Виктория Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

КОРНЕЕВ Константин Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: energy-tver@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Прокофьев Д.А., Окунева В.В., Корнеев К.Б. Энергоэффективная система автоматического управления охлаждением силового трансформатора// Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 1 (17). С. 61–69.

**ENERGY EFFICIENT SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL
OF POWER TRANSFORMER COOLING**

D.A. Prokofev, V.V. Okuneva, K.B. Korneev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The factors leading to inefficient operation of transformer cooling systems, in particular autotransformers, are described. There are 8 types of cooling systems that are used depending on the power of the transformer, the power losses that occur during its operation. A general view of the DC type transformer cooling system is given. The consequences of maintaining low oil temperatures, taking into account the characteristic loading of transformers, are indicated. It is concluded that the introduction of software and hardware complexes for controlling the cooling system using electronically switched motors will make it possible to increase the cooling efficiency, the resource of transformers, reduce energy consumption, and therefore reduce the economic costs of its maintenance.

Keywords: cooling system, automatic cooling control, energy efficiency of substations, electronically commutated motors, software and hardware complex.

REFERENCES

1. Regulations «On the Unified Technical Policy in the Electric Grid Complex» (new version). Approved by the decision of the Board of Directors of PJSC FGC UES (Protocol No. 496 dated April 9, 2020). Moscow. 2020. 187 p. (In Russian).

2. The volume of free transformer capacity. Disclosure of information in accordance with the Decree of the Government of the Russian Federation dated January 21, 2004 No. 24. PJSC Rosseti FGC UES. URL: https://www.fsk-ees.ru/consumers/disclosures_in_accordance_with_government_decree_of_21_01_2004_24/obem_svobodnoy_transformatornoy_moshchnosti/ (date of access: 10.10.2022). (In Russian).
3. Rusin A.Yu. Reducing the time of testing electrical equipment for reliability. *Bulletin of the Tver State Technical University. Series: Construction. Electrical engineering and chemical technologies*. 2020. No. 3 (7), pp. 60–68. (in Russian).
4. STO 56947007-29.180.01.116-2012 (as amended on 10/13/2014) Operating instructions for transformers. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

PROKOFEV Denis Alexandrovich – master's student, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: prokofeae@mail.ru

OKUNEVA Victoria Valerievna – candidate of technical sciences, associate professor of the department of power supply and electrical engineering, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

KORNEEV Konstantin Borisovich – candidate of technical sciences, associate professor of the department of power supply and electrical engineering, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: energy-tver@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Prokofev D.A., Okuneva V.V., Korneev K.B. Energy efficient system of automatic control of power transformer cooling // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2022. No. 1 (17), pp. 61–69.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 544.032.7

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ КАТАЛИТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ АРОМАТИЧЕСКИХ ПРЕКУРСОРОВ В СИНТЕЗЕ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

*Ю.А. Белоусова, Н.В. Лакина, В.Ю. Долуда,
Е.Д. Степанов, К.Э. Соловьев*

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Белоусова Ю.А., Лакина Н.В., Долуда В.Ю.,
Степанов Е.Д., Соловьев К.Э., 2023

Аннотация. Изучены условия эффективной трансформации алифатических спиртов в присутствии катализаторов типа ZSM-5. Сделаны выводы, что для получения наибольшего количества ароматических фракций C_{6+} , необходимых для образования биологически активных веществ, требуется проводить процесс трансформации при температуре 450 °С; наибольшее значение концентрации фазы C_5-C_6 (39,5 масс. %) достигается при скорости подачи алифатического спирта 0,3 мл/мин, наименьшее (15,5 масс. %) – при скорости 0,15 мл/мин.

Ключевые слова: синтез углеводов, цеолит, каталитическая трансформация, алифатические спирты, ароматические углеводороды.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-70-78

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время синтез синтетических углеводов стал крайне важным из-за сокращения естественных источников получения сырья, энергетических и экологических проблем, а также из-за изменений климата, вызванных в частности выбросами парниковых газов.

Искусственные углеводороды можно получить из различного органического материала: растений и остатков сельскохозяйственных культур (биомассы). Эти продукты могут служить полноценной альтернативой природным углеводородам, производимым из нефти, газа. Сегодня по причине развития передовых технологий имеет место значительный спрос на косметические вещества и энергию, что приводит к чрезмерному потреблению ископаемого сырья.

Синтетические углеводороды также содержат намного меньше серы и азота, чем нефтяные источники. Выбросы углекислого газа являются нежелательными, неприятными последствиями химического производства. Объемы этих выбросов продолжают увеличиваться, что негативно сказывается на окружающей среде. На рис. 1 представлены

данные о выбросах углекислого газа, возникших на химических производствах, в различных странах [1–4].

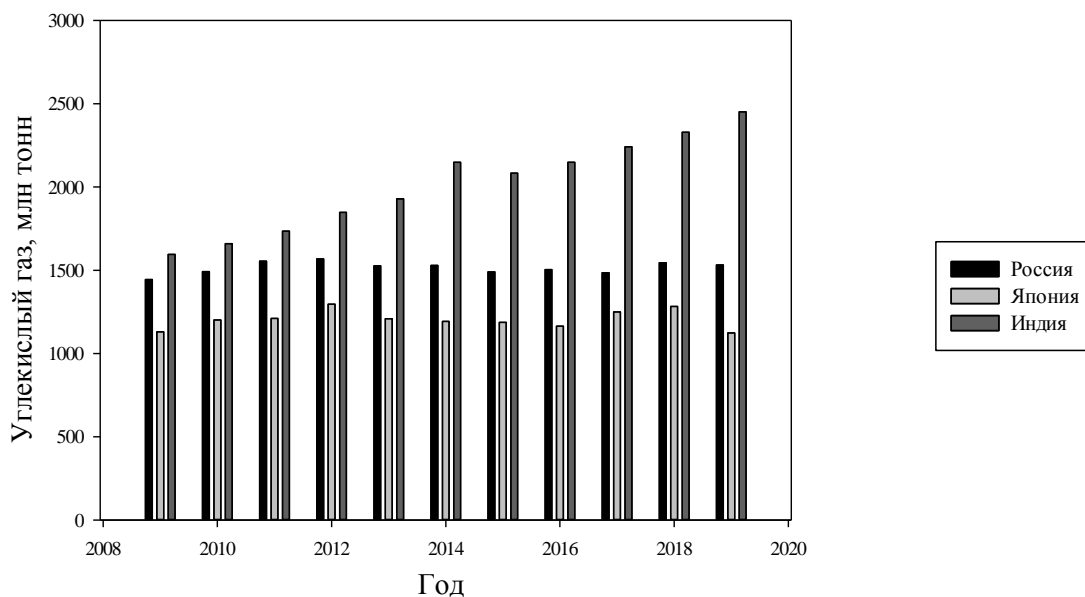


Рис. 1. Статистические данные по выбросу углекислого газа

Наиболее важно с экологической точки зрения искать возможности перехода с природного сырья и природных углеводородов на синтетические, возникающие при разнообразных химических превращениях. Наиболее простой и дешевый способ получения синтетических углеводородов – каталитический синтез спиртов на мезопористом цеолитном катализаторе HZSM-5. Благодаря этому процессу можно создать широкий спектр различных углеводородов, которые могут быть использованы во многих сферах жизнедеятельности человека.

Цеолиты представляют собой мезопористые кристаллические твердые вещества с четкой структурой (рис. 2) [7].

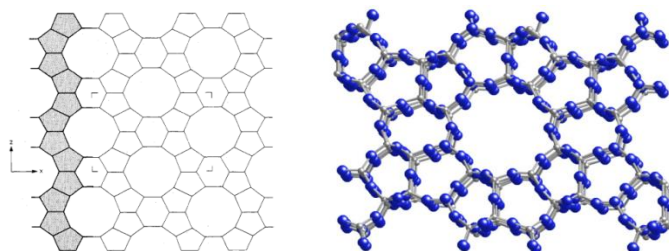


Рис. 2. Структура катализатора

Катализаторы неорганической природы обычно содержат систему пор и полостей дискретного размера, сравнимых по этому параметру с небольшими органическими молекулами. Из-за дешевизны и универсальности катализатор используется в различных химических операциях, например сорбции, каталитическом превращении, операциях ионного обмена [8, 9].

Важной особенностью структуры цеолитов является наличие трехмерного анионного каркаса, построенного из тетраэдров SiO_4 и AlO_4 , связанных друг с другом посредством прочных мостиков Si-O-Si и Si-O-Al . Благодаря этому образуется система внутрикристаллических пор и полостей, в которых легко происходят окклюзия и образование молекул соответствующего размера. С наличием этих пор и полостей в каркасе безводного цеолита связаны важные молекулярно-ситовые свойства цеолитов, в частности способность к избирательной адсорбции и десорбции молекул определенных размеров (рис. 3) [10].

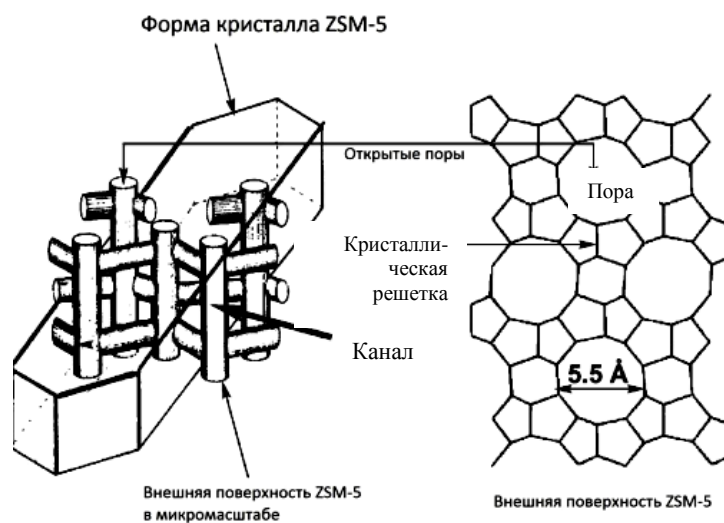


Рис. 3. Схематичное изображение каналов и внешней поверхности цеолита

Ионы алюминия занимают особое положение в кристаллической решетке цеолитов. Они изоморфно замещают в каркасе ионы кремния, но имеют тетраэдрическую координацию по отношению к ионам кислорода. Вследствие этого координационное число и валентность алюминия не совпадают, что приводит к появлению избыточного отрицательного заряда на алюмокислородном тетраэдре AlO_4 . Этот заряд может быть компенсирован либо катионом металла, либо протоном (в декатионированных формах цеолита). Компенсирующий протон образует ковалентную связь с одним из четырех атомов кислорода в тетраэдре AlO_4 , в результате чего образуются изолированные структурные гидроксильные группы мостикового типа, являющиеся сильными брэнстедовскими кислотными центрами (В-центрами, БКЦ), в свою очередь, обладающими протонодонорными свойствами (рис. 4).

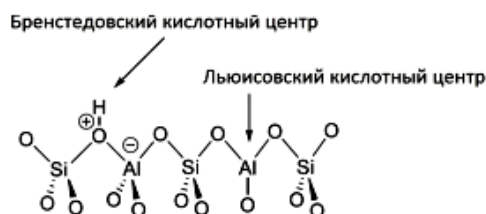


Рис. 4. Брэнстедовские и льюисовские кислотные центры в цеолитах

Цеолиты содержат также апротонные, или льюисовские, кислотные центры (L-центры, ЛКЦ), обладающие электроноакцепторными свойствами (см. рис. 4). К ним относятся различные координационно не насыщенные атомы или ионы решетки, имеющие вакантную р-орбиталь, а также обменные катионы с положительным зарядом. При дегидроксигенировании водородных форм цеолитов образуются тетраэдры AlO_4 , лишенные протона, который компенсирует их заряд, и характеризующиеся свойствами оснований Льюиса. Предполагается, что центрами, определяющими каталитическую активность H-форм цеолитов в ароматизации алифатических углеводородов, являются сильные БКЦ, на которых протекают реакции крекинга, олигомеризации и ароматизации олигомерных структур. В то же время не исключается участие на некоторых стадиях ЛКЦ.

Особенности морфологического строения и распределения кислотных центров ZSM-5 позволяют получить катализатор, при работе на котором достигается максимальная конверсия спиртов и демонстрируется высокая селективность в отношении углеводородов с содержанием углеродных атомов больше 6 (C_{6+}).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование процесса каталитической трансформации изопропанола проводилось в трубчатой реакторной установке непрерывного действия (рис. 5).

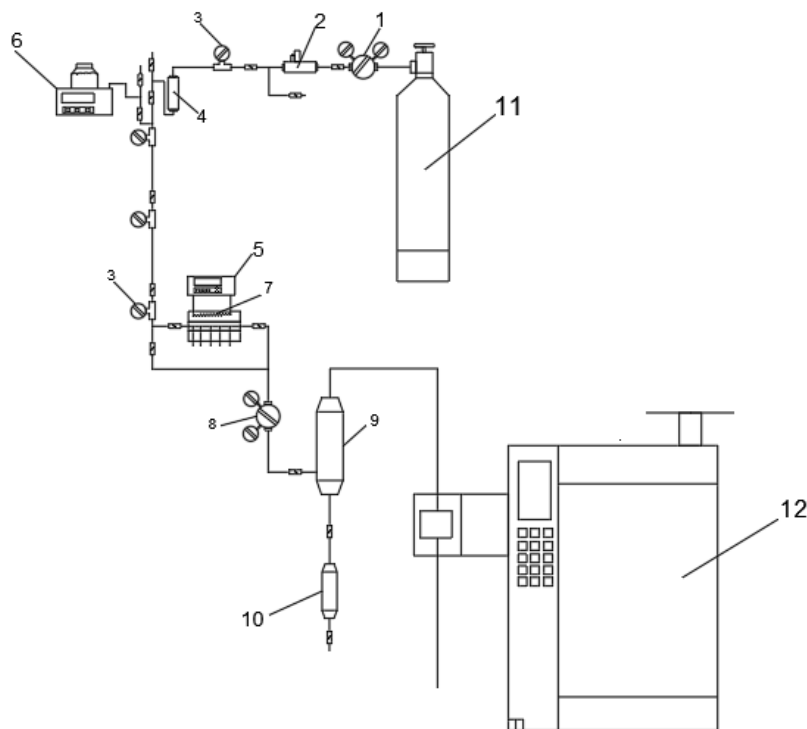


Рис. 5. Реакторная установка трансформации изопропанола в углеводороды:
1 – редуктор давления азота; 2 – дозатор массового расхода азота; 3 – манометр;
4 – буферная емкость; 5 – контроллер температуры;
6 – насос для подачи изопропанола; 7 – реактор синтеза углеводородов;
8 – регулятор давления в системе; 9 – холодильник; 10 – коллектор фракций;
11 – баллон с азотом; 12 – хроматограф

В смеситель, нагретый до необходимой температуры и заполненный стеклянными шариками или катализатором (в зависимости от режима проведения эксперимента), насосом подавался изопропанол. При этом происходило образование паровой смеси. Газовая смесь изопропанола и (или) азота поступала в реактор с цеолитом, где происходил синтез дипропилового эфира. Полученный дипропиловый эфир отделялся от воды и изопропанола в холодильнике, затем поступал в реактор, нагретый до необходимой реакционной температуры (450 °С) и заполненный цеолитом. Жидкие пробы отбирались один раз в сутки; определяли массу, долю жидкой фракции и состав углеводородной фракции.

Анализ продуктов реакции проводился методом газовой хроматографии с помощью газового хроматографа «Кристалл-2000» (Россия), оснащенного пламенно-ионизационным детектором и детектором по теплопроводности с использованием капиллярной колонки MS-1; диаметр колонки составлял 0,32 мм, максимальная температура ее термостатирования 310 °С.

Температура термостата хроматографа 50 °С, испарителя 300 °С; давление было равно 182,9 кПа. Общий поток гелия через колонку 81,5 мл/мин, поток газа через колонку 1 мл/мин, линейная скорость газов 19,9 см/с, продувочный поток 5 мл/мин, коэффициент деления потока равен 1, давление в испарителе 200 кПа, время введения пробы 5,00 с.

Программа изменения температуры: выдержка 10 мин при 50 °С, подъем до 310 °С со скоростью 10 °С/мин, выдержка 15 мин. Время подготовки хроматографа 1 мин. Температура источников ионов 260 °С, интерфейса 280 °С; продолжительность анализа 51 мин. Начальная измеряемая масса 10 а. е. м., конечная 400 а. е. м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Было проведен поиск наиболее благоприятной температуры осуществления процесса каталитической трансформации спирта в синтетические прекурсоры синтеза биологически активных веществ и оптимального времени нахождения изопропанола в реакторе, заполненного катализатором типа ZSM-5 для получения наибольшего процентного содержания фракций, имеющих в составе компоненты ароматического происхождения. В серии опытов была выявлена оптимальная температура процесса, равная 450 °С. Данные, полученные в ходе экспериментов, были обработаны с помощью газового хроматографа «Кристалл 2000М».

В ходе опыта пробы отбирались ежедневно в течение нескольких дней. Результаты представлены в виде диаграммы (рис. б) с соответствующим разделением по углеродному составу. Мы видим на ней распределение концентраций фазы C₅–C₆ в зависимости от скорости подачи спирта (изопропанола) в реактор при температуре 450 °С. Наибольшее значение концентрации фазы C₅–C₆ (39,5 масс. %) достигается при скорости, равной 0,3 мл/мин, наименьшее (15,5 масс. %) – при скорости подачи алифатического спирта 0,15 мл/мин.

Полученные данные представлены в таблице.

Результаты проведенного эксперимента свидетельствуют о том, что выход фракционного состава зависит от времени реакции трансформации алифатического спирта. Эти данные показывают, что оптимальное время реакции для получения наиболее ценных ароматических углеводородов находится в интервале 54–102 ч. Наибольший выход продемонстрировали следующие углеводородные группы: C₅–C₆; C₇–C₈; C₁₀–C₁₁.

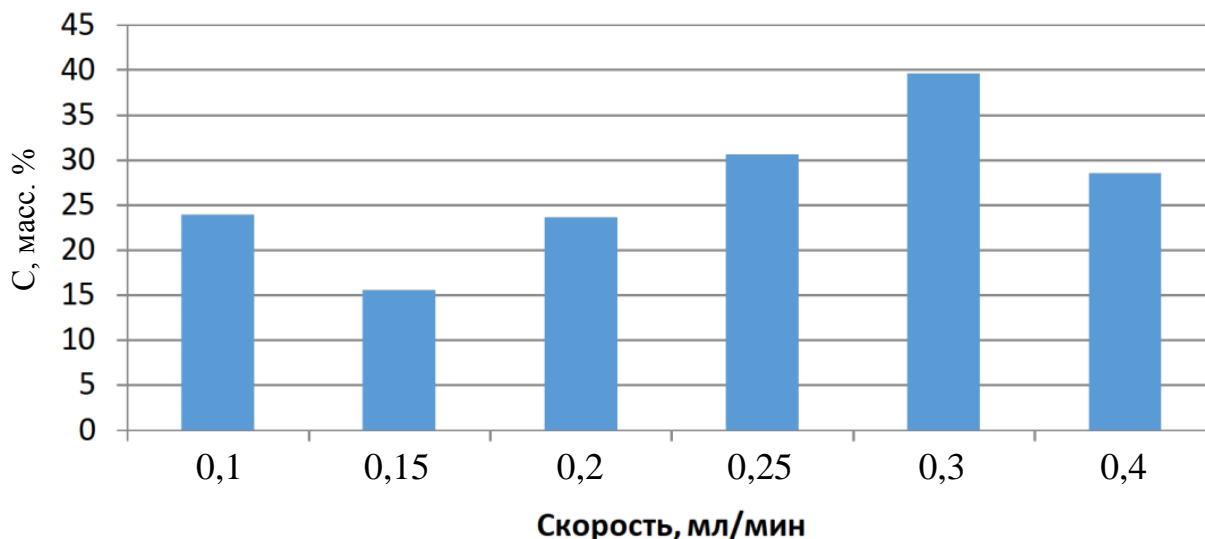


Рис. 6. Распределение концентраций фазы C₅-C₆ в зависимости от скорости подачи спирта (изопропанола) в реактор

Зависимость концентрации углеводородных групп от времени протекания реакции при температуре 450 °С

Время реакции, ч	Концентрация углеводородной группы, масс. %					
	C ₁ -C ₄	C ₅ -C ₆	C ₇ -C ₉	C ₁₀ -C ₁₁	C ₁₂ -C ₁₅	C ₁₆₊
24	0,0	2,0	28,0	35,0	23,0	12,5
30	0,0	4,0	24,0	35,0	28,0	9,0
48	0,0	1,0	16,0	36,0	37,0	9,8
54	1,5	23,0	23,0	25,0	24,0	4,2
72	2,0	23,0	24,0	24,7	22,0	4,0
78	2,1	25,0	25,0	22,0	20,0	5,5
96	1,7	27,0	27,0	22,0	18,0	3,5
102	2,1	31,0	27,0	20,0	16,0	3,0
120	0,0	8,0	25,0	30,0	29,0	8,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее ценными продуктами, получаемыми на основе вышеперечисленных фракций, являются гексан и изомеры гексана, циклопропан, 1,1,2,2-тетрамethylциклопропан. Гексан – нейтральный растворитель лакокрасочных материалов, различных видов клея для мебели и обуви, адгезивов. Отметим, что из изомеров гексана подходят для рассмотренного нами процесса только имеющие наиболее разветвленную цепь – диметилгексаны (н-гексан ввиду склонности к детонации, наоборот, снижает

качество бензина). Циклопропан применяют для вводного и поддерживающего наркоза при кратковременных операциях (масочным методом), в сочетании с другими общими анестетиками и миорелаксантами – для наркоза при продолжительных оперативных вмешательствах. Циклопропан в концентрациях, обеспечивающих достаточную глубину общей анестезии, не оказывает влияния на слизистые оболочки дыхательных путей, функции печени и почек, не изменяет сократительную активность миокарда и не вызывает расстройств гемодинамики. 1,1,2,2-тетраметилциклопропан может быть промежуточным соединением для синтеза синтетических каннабиоидов.

Природные источники углеводородов исчерпаемы, поэтому переход на синтетические углеводороды сейчас крайне актуален. Одним из самых востребованных методов для получения указанных веществ является каталитическая трансформация алифатических спиртов в ароматические углеводороды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vasquez S.T. Transformation of acetone and isopropanol to hydrocarbons using HZSM-5 catalyst. Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science. Texas, 2009. 145 p.
2. Perkins G., Batalha N., Kumar A., Bhaskar T., Konarova M. Recent advances in liquefaction technologies for production of liquid hydrocarbon fuels from biomass and carbonaceous wastes // *Renewable and Sustainable Energy Review*. 2009. № 115. Pp. 56–79.
3. Vasquez S.T., Holtzapple M.T. Conversion of isopropanol and mixed alcohols to hydrocarbons using HZSM-5 catalyst in the MixAlco process // *Reaction Engineering, Kinetics and Catalysis*. 2013. № 59. Pp. 2549–2557.
4. Karthikeyan K.R., Yong W. Catalyst activity comparison of alcohols over zeolites // *Journal of Energy Chemistry*. 2013. № 22. Pp. 65–71.
5. Gayubo A.G., Aguyo A.T., Atutxa A., Aguado R., Bilbao J. Transformation of oxygenate components of biomass pyrolysis oil on a HZSM-5 zeolite. I. Alcohols and phenols // *Kinetics, Catalysis and Reaction Engineering*. 2004. № 43. Pp. 2610–2618.
6. Looney B. Carbon dioxide emissions // *Statistical review of world energy*. 2020. № 69. P. 15.
7. Olson D.H., Kokotailo G.T., Lawton S.L., Meier W.M. Crystal structure and structure-related properties of ZSM-5 // *J. Phys. Chem.* 1981. № 85. Pp. 2238–2243.
8. Barrer R.M. Hydrothermal chemistry of zeolites. L.: Academic Press, 1982. 360 p.
9. Čejka J., van Bekkum H., Corma A., Schüth F. Introduction to zeolite science and practice // *Studies in surface science and catalysis*. 2007. № 168. Pp. 1–1058.
10. Lei X., Jockush S., Ottaviani F., Turro N.J. In situ EPR investigation of the addition of persistent benzyl radicals to acrylates on ZSM-5 zeolites. Direct spectroscopic detection of the initial steps in a supramolecular photopolymerization // *Photochem. Photobiol.* 2003. V. 2. Pp. 1095–1100.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БЕЛОУСОВА Юлия Андреевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: belousowa.yuliya2013@yandex.ru

ЛАКИНА Наталия Валерьевна – кандидат химических наук, доцент кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: lakina@yandex.ru

ДОЛУДА Валентин Юрьевич – доктор химических наук, доцент кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: doludav@yandex.ru

СТЕПАНОВ Евгений Денисович – студент, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: Zerus2002@gmail.com

СОЛОВЬЕВ Кирилл Эдуардович – студент, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kirill050499@gmail.com

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белюсова Ю.А., Лакина Н.В., Долуда В.Ю., Степанов Е.Д., Соловьев К.Э. Изучение эффективных каталитических процессов для получения ароматических прекурсоров в синтезе биологически активных веществ // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 1 (17). С. 70–78.

STUDY OF EFFECTIVE CATALYTIC PROCESSES FOR OBTAINING AROMATIC PRECURSORS IN THE SYNTHESIS OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES

Yu.A. Belousova, N.V. Lakina, V.Yu. Doluda, E.D. Stepanov, K.E. Soloviev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The conditions of effective transformation of aliphatic alcohols in the presence of ZSM-5 type catalysts have been studied. It is concluded that in order to obtain the largest amount of aromatic C₆+ fractions necessary for the formation of biologically active substances, it is necessary to carry out the transformation process at a temperature of 450 ° C; the highest concentration of the C₅–C₆ phase (39.5 wt. %) is achieved at an aliphatic alcohol supply rate of 0.3 ml/min, the lowest (15.5 wt.%) – at a rate of 0.15 ml/min.

Keywords: synthesis of hydrocarbons, zeolite, catalytic transformation, aliphatic alcohols, aromatic hydrocarbons.

REFERENCES

1. Vasquez S.T. Transformation of acetone and isopropanol to hydrocarbons using hzsm-5 catalyst. Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University in partial fulfillment of the requirements for the degree of master of science. Texas, 2009. 145 p.
2. Perkins G., Batalha N., Kumar A., Bhaskar T., Konarova M. Recent advances in liquefaction technologies for production of liquid hydrocarbon fuels from biomass and carbonaceous. *Renewable and Sunstainable Energy Review*. 2009. No. 115, pp. 56–79.

3. Vasquez S.T., Holtzaple M.T. Conversion of isopropanol and mixed alcohols to hydrocarbons using HZSM-5 catalyst in the MixAlco process. *Reaction Engineering, Kinetics and Catalysis*. 2013. No. 59, pp. 2549–2557.
4. Karthikeyan K.R., Yong W. Catalyst activity comparison of alcohols over zeolites. *Journal of Energy Chemistry*. 2013. No. 22, pp. 65–71.
5. Gayubo A.G., Aguyo A.T., Atutxa A., Aguado R., Bilbao J. Transformation of oxygenate components of biomass pyrolysis oil on a HZSM-5 zeolite. I. Alcohols and phenols. *Kinetics, Catalysis and Reaction Engineering*. 2004. No. 43, pp. 2610–2618.
6. Looney B. Carbon dioxide emissions. *Statistical review of world energy*. 2020. No. 69, p. 15.
7. Olson D.H., Kokotailo G.T., Lawton S.L., Meier W.M. Crystal structure and structure-related properties of ZSM-5. *J.Phys. Chem.* 1981. No. 85, pp. 2238–2243.
8. Barrer R.M. Hydrothermal chemistry of zeolites. L.: Academic Press, 1982. 360 p.
9. Čejka J., van Bekkum H., Corma A., Schüth F. Introduction to zeolite science and practice. *Studies in surface science and catalysis*. 2007. No. 168, pp. 1–1058.
10. Lei X., Jockush S., Ottaviani F., Turro N.J. In situ EPR investigation of the addition of persistent benzyl radicals to acrylates on ZSM-5 zeolites. Direct spectroscopic detection of the initial steps in a supramolecular photopolymerization. *Photochem. Photobiol.* 2003. V. 2, pp. 1095–1100.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BELOUSOVA Yulia Andreevna – undergraduate, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: belousowa.yuliya2013@yandex.ru

LAKINA Natalia Valerievna – candidate of chemical sciences, associate professor of the department of biotechnology, chemistry and standardization, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: lakina@yandex.ru

DOLUDA Valentin Yurievich – doctor of chemical sciences, associate professor of the department of biotechnology, chemistry and standardization, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: doludav@yandex.ru

STEPANOV Evgeny Denisovich – student, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Zerus2002@gmail.com

SOLOVIEV Kirill Eduardovich – student, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kirill050499@gmail.com

CITATION FOR AN ARTICLE

Belousova Yu.A., Lakina N.V., Doluda V.Yu., Stepanov E.D., Soloviev K.E. Study of effective catalytic processes for obtaining aromatic precursors in the synthesis of biologically active substances // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 1 (17), pp. 70–78.

УДК 674.093

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УДЛИНЯЮЩЕГОСЯ РЯДА НАБЛЮДЕНИЙ
ЗА КИСЛОТНОСТЬЮ ОСАДКОВ, ВЫПАДАЮЩИХ В ТВЕРИ****Ф.В. Качановский***Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Качановский Ф.В., 2023

Аннотация. Проведен статистический анализ динамики кислотности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 1990–2022 гг. Установлено, что в последние 5–6 лет наблюдавшееся ранее снижение значений водородного показателя кислотности осадков pH прекратилось. Еще раз подтверждена обоснованность применения полиномиальных моделей для анализа тренда ряда pH . Сделан вывод, что внутригодовая динамика кислотности осадков за последние 9 лет изменилась несущественно. Установлено, что температура воздуха статистически значимо влияет на колебания кислотности осадков.

Ключевые слова: кислотность, атмосферные осадки, модель, временной ряд, тренд, циклическая компонента, сезонная компонента, случайная компонента, показатель кислотности pH .

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-79-88

Состояние природной среды во многом определяется кислотностью атмосферных осадков, поэтому показатель кислотности pH служит одной из важных экологических характеристик. Лаборатория мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии с 1990 г. ведет в Твери наблюдения за кислотностью атмосферных осадков, измеряя значения pH . Автор настоящей статьи начиная с 2009 г. использует полученные лабораторией результаты для проведения статистического анализа показателя pH и регулярно публикует результаты [1–10].

Срочные значения показателя pH , зафиксированные с 1990 по 2022 г., преобразуются в среднемесячные значения, множество которых образует временной ряд длиной в 33 года с постоянным (месячным) шагом. Число членов (месяцев) ряда наблюдений достигло 396. Члены ряда обозначаются как $ampH$ ($am = average month$, т.е. среднемесячные значения), а номера членов ряда – как t . Временной ряд значений $ampH$ подвергается статистическому анализу.

Ряд $ampH$ в интервале 1990–2022 гг. представлен на рис. 1. Значения $ampH$ за период наблюдений находились в диапазоне 4,3–7,8 единиц.

При сравнительно равномерных колебаниях $ampH$ с течением времени происходит постепенное уменьшение их значений. С октября 2005 г. до февраля 2009 г. равномерные колебания $ampH$ нарушает интервенция (вмешательство в процесс) некоторого фактора неизвестного происхождения. Интервенция (она хорошо видна на рис. 4) проявляется в удвоении амплитуды колебаний $ampH$ и продолжается более 3 лет.

При анализе последовательность значений $ampH$ рассматривается как нестационарный временной ряд. С учетом результатов предыдущих исследований [1–5]

модель ряда $amrH$ принята состоящей из четырех аддитивных компонент: трех детерминированных (циклической, сезонной и тренда) и одной случайной [11].

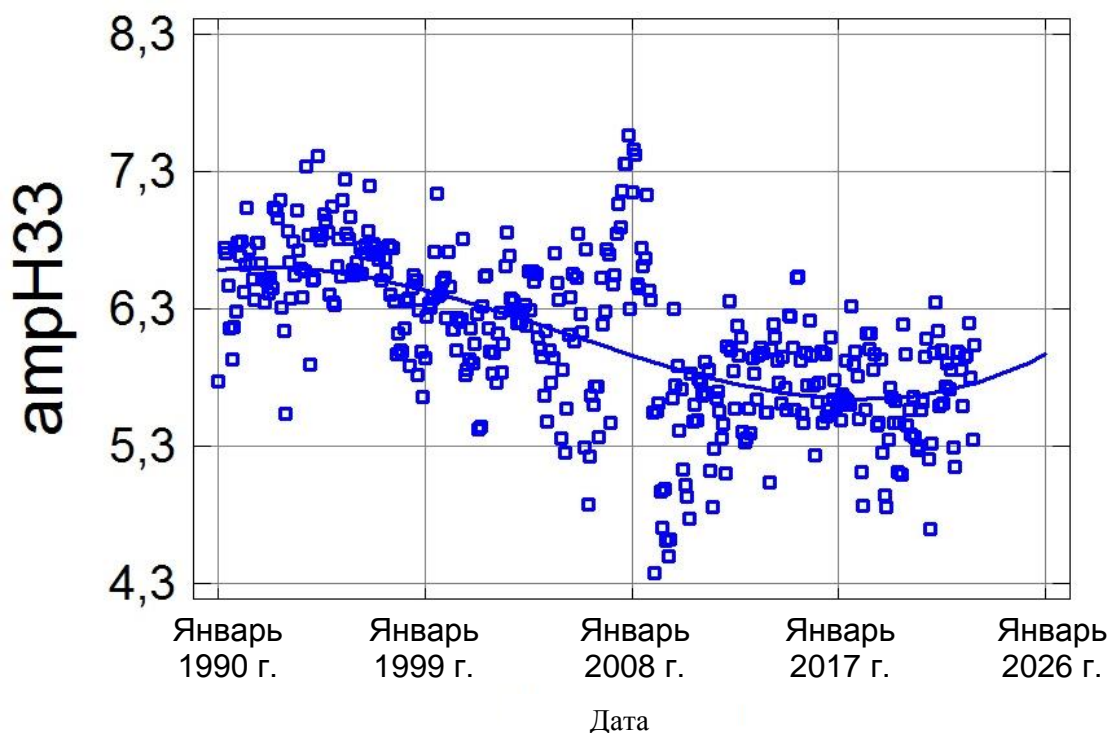


Рис. 1. Ряд $amrH33$ (1990–2022 гг.) и его кубический тренд

Тренды рядов $amrH$ разной длины показывают, что в течение почти 30 лет среднемесячные значения $amrH$ снижались, т.е. кислотность атмосферных осадков, выпадающих в Твери, росла. При этом скорость снижения $amrH$ с 2002 г. начинает уменьшаться. Это проявилось в появлении точек перегиба на линиях трендов. Срединная часть линий кубических трендов (1995–2010 гг.) сравнительно устойчива и демонстрировала постепенное уменьшение значений $amrH$.

Тренды рядов четырех последних лет (30–33 года) описываются уравнениями:

$$tr_{30} = 6,588\ 96 + 0,001\ 475\ 41 \cdot t - 0,000\ 033\ 498\ 7 \cdot t^2 + 0,619\ 26 \cdot 10^{-7} \cdot t^3; \quad (1)$$

$$tr_{31} = 6,603\ 84 + 0,000\ 891\ 642 \cdot t - 0,000\ 028\ 762 \cdot t^2 + 0,518\ 763 \cdot 10^{-7} \cdot t^3; \quad (2)$$

$$tr_{32} = 6,590\ 31 + 0,001\ 397\ 48 \cdot t - 0,000\ 032\ 665\ 5 \cdot t^2 + 5,974\ 83 \cdot 10^{-8} \cdot t^3; \quad (3)$$

$$tr_{33} = 6,583\ 29 + 0,001\ 650\ 48 \cdot t - 0,000\ 034\ 545\ 3 \cdot t^2 + 6,339\ 63 \cdot 10^{-8} \cdot t^3; \quad (4)$$

где t – порядковый номер месяца в ряду.

Уравнения (1)–(4) показывают, что при удлинении ряда $amrH$ коэффициенты кубической модели тренда изменяются несущественно и немонотонно. Свободный член у 31-летнего ряда несколько больше, чем у остальных рядов, а абсолютные значения других коэффициентов ряда, наоборот, имеют значения, меньшие, чем у других рядов.

На большей (срединной) части своей длины тренды практически совпадают [1–10] и единообразно описывают моделируемую временную последовательность. Только на концевом участке модель тренда заметно реагирует на удлинение ряда.

Перегиб линий тренда, с которого начинает уменьшаться скорость снижения значений $ampH$, т.е. момент времени, когда скорость снижения перестает расти, по мере удлинения ряда наступает все позже.

Минимум тренда 30-летнего ряда ($ampH = 5,651\ 84$) наступает при $t = 337$ (в январе 2018 г.), т.е. достигается за 23 мес. до конца ряда. Затем начинается ускоренный рост значений $ampH$, продолжающийся до конца периода наблюдений. Минимум одного модельного тренда не означает, разумеется, что реальный процесс снижения значений показателя $ampH$ остановился. Это становится очевидным из дальнейшего рассмотрения трендов более длинных рядов. Так, тренд 31-летнего ряда достигает своего минимума ($ampH = 5,616\ 48$) в мае 2019 г., т.е. за 19 мес. до конца ряда, 32-летнего ряда ($ampH = 5,637\ 59$) – в июне 2018 г. (42 мес. до конца ряда). При этом значение минимума 32-летнего ряда оказывается несколько больше, чем у 31-летнего. Наконец, минимум 33-летнего ряда ($ampH = 5,642\ 57$) наступает в феврале 2018 г., т.е. за 58 мес. до конца ряда. Это означает, что концевой участок тренда все более расплывается. Такое соотношение параметров сравниваемых рядов позволяет предположить, что минимум среднемесячных значений показателя кислотности $ampH$ был практически достигнут в конце 2017 г., но не позже апреля 2018 г. Об этом же свидетельствуют минимумы концевых участков трендов 30-летнего и 33-летнего рядов $ampH$, показанных на рис. 2.

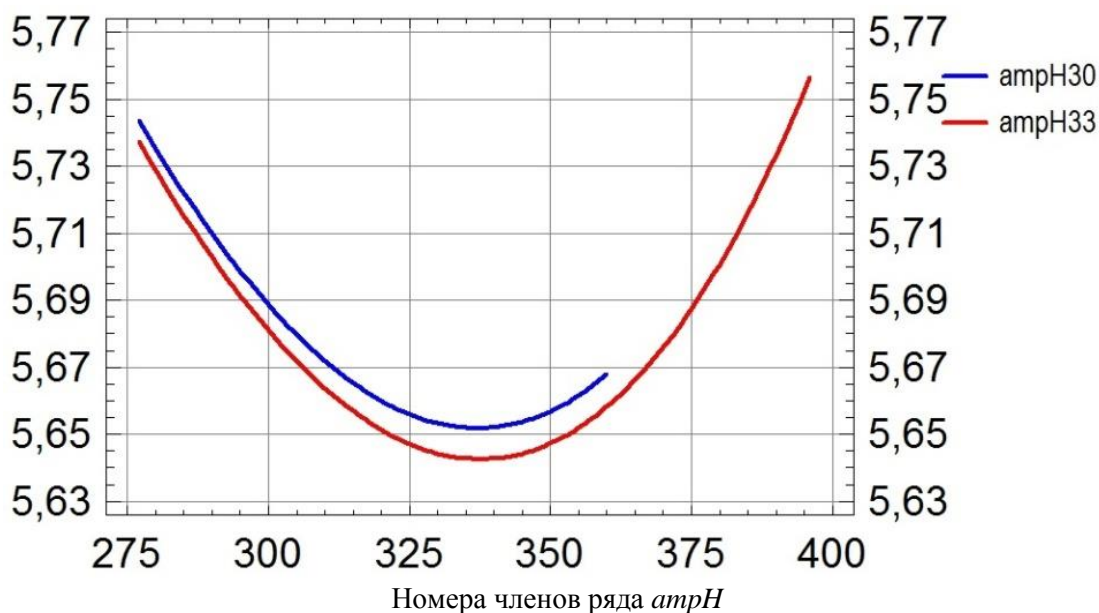


Рис. 2. Концевые участки трендов $ampH30$ и $ampH33$

Рассмотренный материал показывает, что применение кубического тренда обеспечило локализацию (обнаружение) максимума кислотности в исследуемом ряду pH благодаря графической простоте тренда. Представляется, однако, интересной и важной возможностью использования для этой цели полиномиального тренда более высокой, 4-й, степени. Уравнение тренда имеет вид

$$trf_{33} = 6,519\ 36 + 0,004\ 696\ 44 \cdot t - 0,000\ 068\ 449\ 3 \cdot t^2 + \\ + 1,951\ 16 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 + 1,651\ 31 \cdot 10^{-10} \cdot t^4.$$

График тренда 4-й степени показан на рис. 3 вместе с графиком кубического тренда. Срединная часть обоих трендов практически совпадает. У кубического тренда локальные экстремумы (максимум и минимум) наступают несколько раньше, чем у тренда указанной степени. Можно считать, что оба тренда приемлемо точно описывают динамику кислотности атмосферных осадков. Таким образом, пока отсутствует необходимость использовать полиномиальную модель 4-й степени в статистическом анализе.

Сезонная декомпозиция 33-летнего ряда $атрН$ (1990–2022 гг.) позволила выделить из ряда тренд и его сумму с циклической компонентой (рис. 4). Из этой суммы вычтен тренд, и таким образом получена циклическая компонента, которая в виде отклонений от нулевых значений дана на рис. 5.

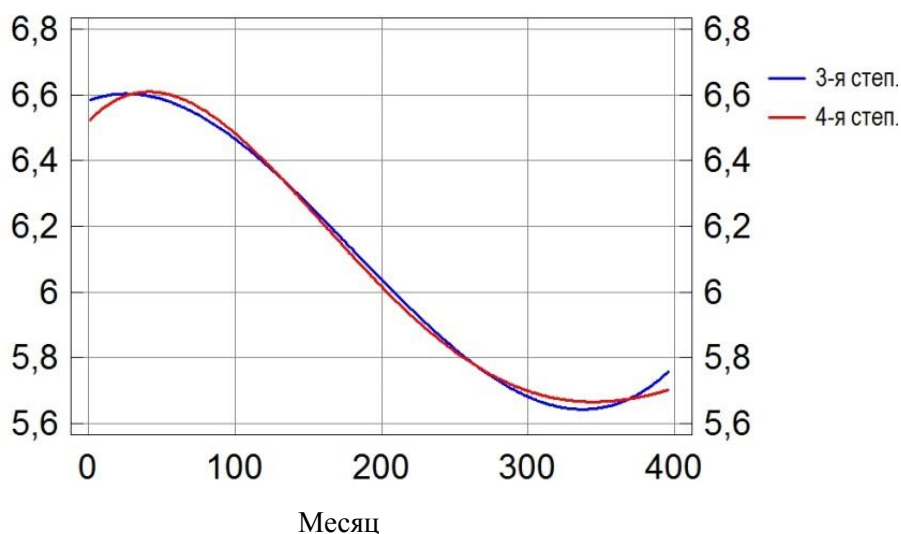


Рис. 3. Полиномиальные тренды $атрН33$ 3-й и 4-й степеней

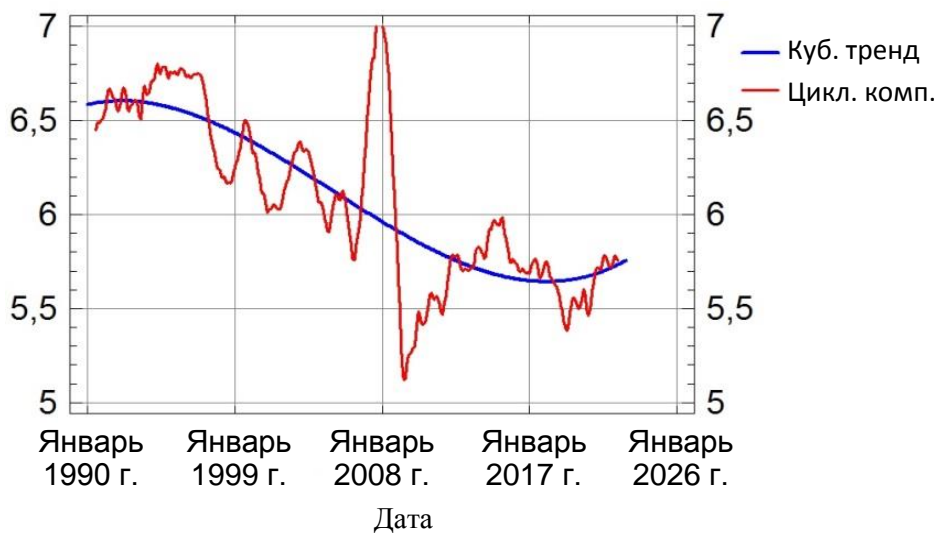


Рис. 4. Кубический тренд и сумма тренда с циклической компонентой ряда $атрН33$ (1990–2022 гг.)

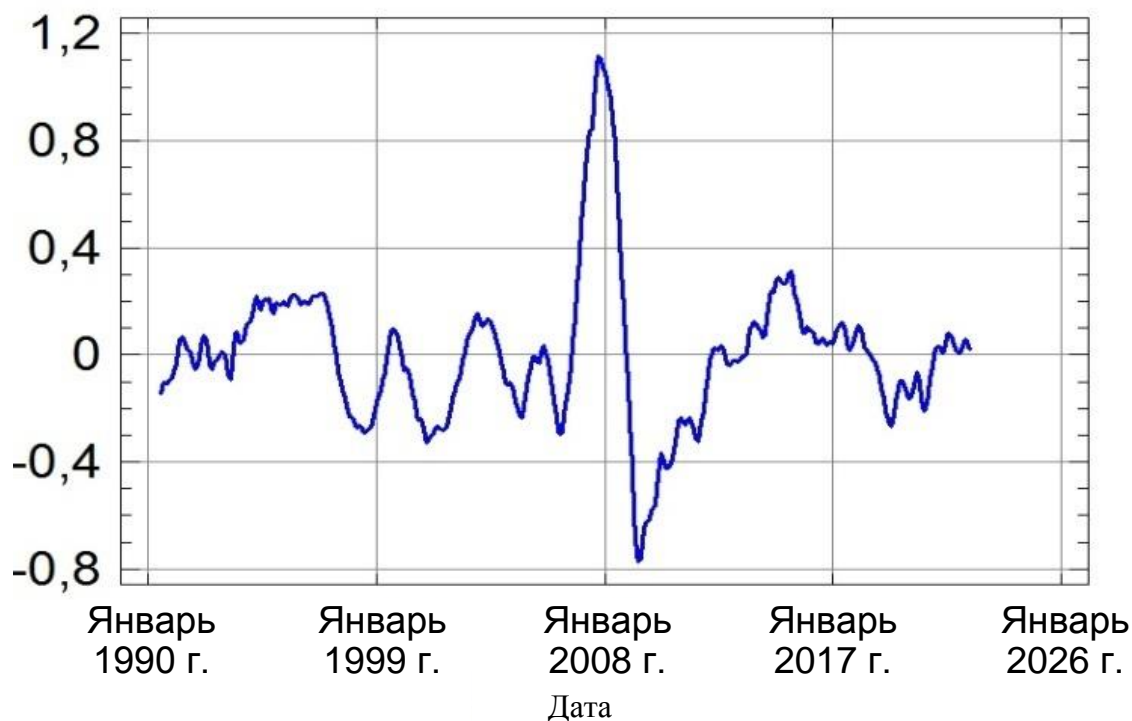
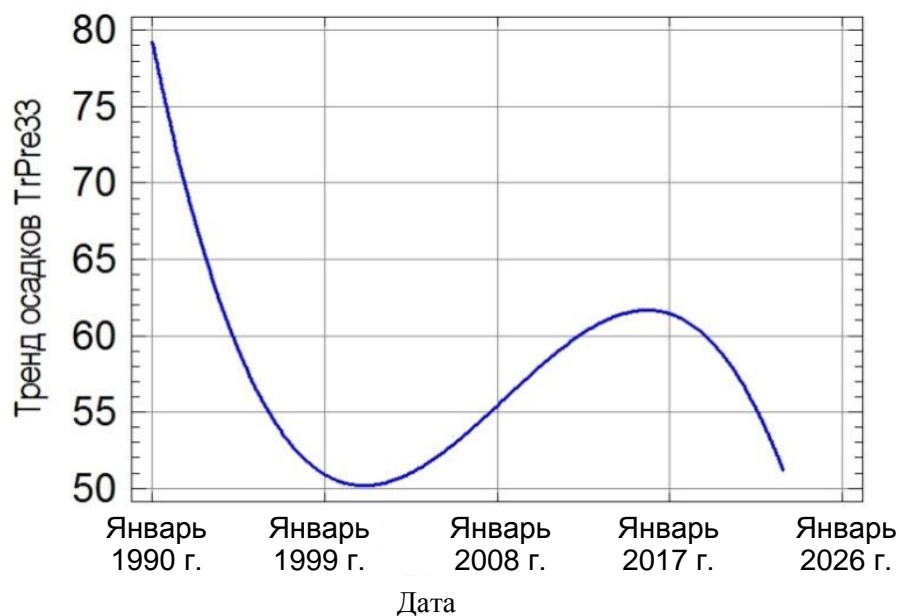


Рис. 5. Циклическая компонента ряда $ampH33$ (1990–2023 гг.)

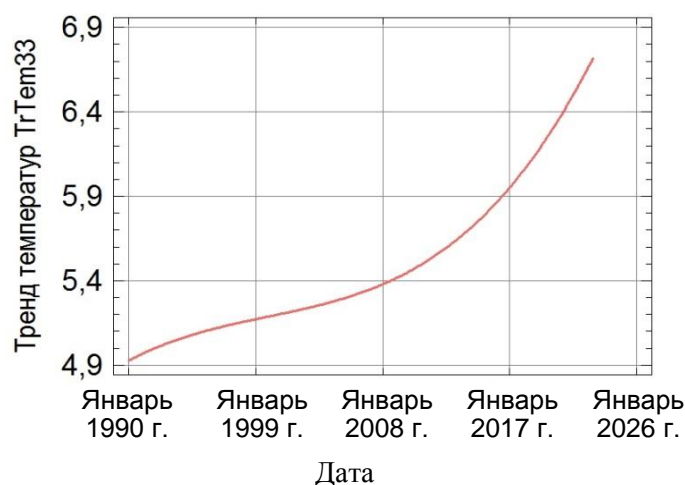
При удлинении ряда наблюдений показателя pH на год (2022-й) характерные черты циклической компоненты остались прежними. Видна не только интервенция 2005–2009 гг., но также «мини-интервенция», приходящаяся на 2015 г. и обсужденная в [9]. Отметим, что разброс значений у циклической компоненты $ampH33$ значительно меньше, чем у исходного ряда и составляет $\sim 1,1$ единиц по сравнению с разбросом значений $ampH32$ в диапазоне $\sim 1,8$. В [9] уже отмечалась условность самого названия этой компоненты («циклическая») применительно к показателю кислотности pH . Величина pH изменчива как по амплитуде колебаний, так и по протяженности циклов. Амплитуда ее изменяется в пределах $0,1-0,53$, а протяженность циклов составляет 1–3 года.

Рассмотрим связь тренда $ampH33$ с трендами метеофакторов, способных оказать влияние на динамику кислотности осадков. На рис. 6 представлен кубический тренд осадков $TrPre33$, а на рис. 7 – температур воздуха $TrTem33$. Оба тренда получены по той же методике, что и тренд $ampH33$.

На тренде осадков отчетливо выступают локальный минимум, приходящийся на февраль 2001 г. (134-й мес. ряда), и локальный максимум, соответствующий ноябрю 2015 г. (311-й мес. ряда). Тренд температур воздуха монотонно возрастающий, с выраженным слабо перегибом в точке, близкой по времени наступления к минимуму тренда осадков.

Рис. 6. Кубический тренд осадков $TrPre33$, мм

Линейная корреляция трендов показателя кислотности $ampH33$ и атмосферных осадков $Pre33$ характеризуется отрицательным значением $-0,023\ 474$. Оно указывает на отсутствие статистически значимой связи между трендами на 90%-м (или выше) доверительном уровне. Заметим попутно, что линейная связь между показателем кислотности $ampH33$ и атмосферными осадками $Pre33$ статистически значима и характеризуется коэффициентом корреляции $-0,071\ 087\ 2$ на 90%-м (и выше) доверительном уровне.

Рис. 7. Кубический тренд ряда температур $TrTem33$

Линейная корреляция трендов $ampH33$ и температуры воздуха $TrTem33$ определяется отрицательным коэффициентом корреляции, равным $-0,847\ 666$; этот

коэффициент указывает на умеренно сильную связь между трендами и статистически значим на 90%-м и выше доверительном уровне. Уравнение корреляции трендов имеет вид

$$tr_{33} = 9,800\ 28 - 0,675\ 874 \cdot TrTem33.$$

Связь между показателем кислотности $ampH33$ и температурой воздуха $Tem33$ определяется положительным коэффициентом корреляции 0,117 559. Коэффициент указывает на существование связи, хотя и сравнительно слабой, но статистически значимой на 95%-м доверительном уровне.

Таким образом, линейная корреляция между рядами показателя кислотности и атмосферных осадков, а также между рядами их кубических трендов статистически не значима. Корреляция же между рядами показателя кислотности и температур воздуха, а также между рядами их кубических трендов статистически значима. Есть основание для утверждения о том, что температура воздуха – важный фактор влияния на колебания кислотности осадков.

Внутригодовую динамику показателя $ampH$ характеризуют месячные индексы, определяемые как простое среднее \hat{s}_i отклонений значений $ampH$ от тренда [8, 11]:

$$\hat{s}_i = \frac{1}{m+1} \cdot \sum_{l=0}^m (ampH_{i+lp} - \hat{tr}_{i+lp}) \text{ для } i=1, \dots, p; \quad (5)$$

где $m+1$ – число периодов (лет) в ряду наблюдений.

На рис. 8 представлены месячные индексы рядов $ampH$ длиной 33, 23 и 13 лет, рассчитанные по формуле (5). Графики индексов 33-летнего и 23-летнего рядов достаточно близки друг к другу, локальные максимумы и минимумы их совпадают по времени. График индексов 13-летнего ряда отличается от них только в 7-м мес., где ему соответствует глобальный максимум, в то время как у двух других рядов в 7-м мес. оказывается один из локальных минимумов, а глобальный максимум наступает в сентябре, т.е. двумя месяцами позже, что труднообъяснимо.

Моделирование случайной компоненты $X(t)$ ряда $ampH33$ производилось так же, как и для более коротких рядов [1–10]: использовался комбинированный случайный процесс авторегрессии-скользящего среднего ARMA(p, q) [11], параметры p и q которого означают порядок процессов авторегрессии и скользящего среднего.

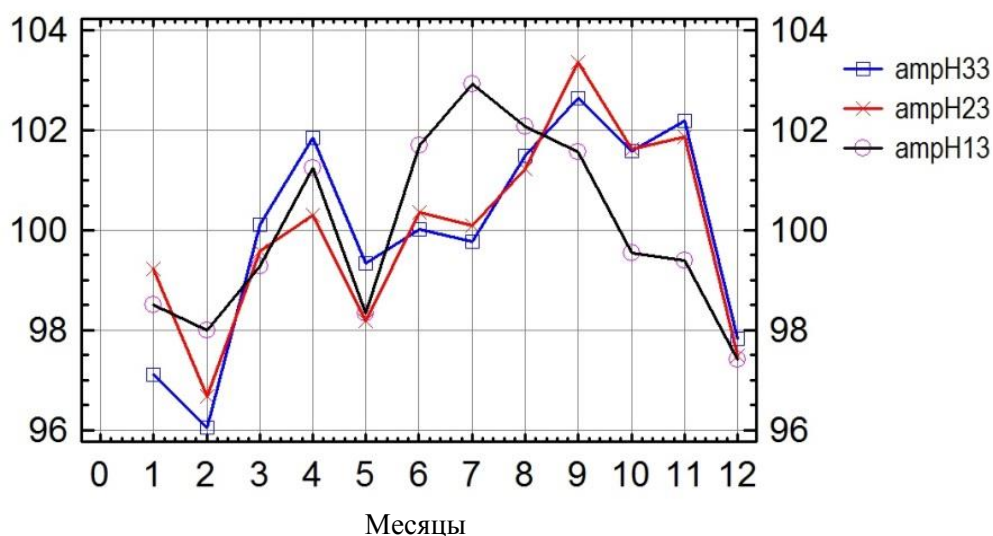


Рис. 8. Сезонные индексы рядов $ampH33$, $ampH23$ и $ampH13$

Модель имеет вид

$$X(t) = \sum_{i=1}^p \varphi_i \cdot X(t-i) + \varepsilon_t + \sum_{j=1}^q \theta_j \cdot \varepsilon_{t-j},$$

где ε_t – процесс белого шума (в котором среднее $M\varepsilon_t = 0$, дисперсия $D\varepsilon_t = 0$); φ – авторегрессионные коэффициенты; θ – коэффициенты скользящего среднего.

При доверительной вероятности 90 % адекватность описания случайного остатка 33-летнего ряда *атрН* достигается при $p = 3$ и $q = 2$, т.е. при тех же значениях, что и для ряда длиной 32 года (2010–2021 гг.). Это указывает на короткую (около 3 мес.) «память» у исследуемой величины.

ВЫВОДЫ

Исследование удлинившегося еще на один год (33-летнего) ряда наблюдений за показателем *рН* кислотности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 1990–2022 гг., показало, что существенное снижение среднемесячных значений этого показателя практически прекратилось. В течение 5–6 последних лет (2015–2021 гг.) средние значения показателя кислотности *рН* колебались в пределах 5,6–5,8, т.е. временной ряд стабилизировался.

Принятая с 26-летнего ряда кубическая модель тренда остается пригодной и для удлинившегося, 33-летнего, ряда. Однако полиномиальная модель 4-й степени тоже оказывается адекватной и готова сменить кубическую модель.

Судя по корреляции между рядами показателя кислотности и температур воздуха, а также между рядами их кубических трендов, можно утверждать, что температура воздуха – статистически значимый фактор влияния на колебания кислотности осадков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Качановский Ф.В. Динамика кислотности атмосферных осадков, выпадающих в Твери (статистический анализ) // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2009. Вып. 15. С. 199–203.
2. Качановский Ф.В. Кислотность атмосферных осадков, выпадающих в Твери (статистический анализ динамики) // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2012. Вып. 22. С. 82–87.
3. Качановский Ф.В. Связь кислотности атмосферных осадков, выпадающих в Твери, с температурой воздуха // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2013. Вып. 2 (24). С. 28–31.
4. Качановский Ф.В. Связь кислотности атмосферных осадков, выпадающих в Твери, с их количеством // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. Вып. 1 (27). С. 34–39.
5. Качановский Ф.В. Эволюция тренда и внутригодовой динамики кислотности осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. Вып. 2 (30). С. 83–87.
6. Качановский Ф.В. Изменение оценок кислотности осадков, выпадающих в Твери, в результате удлинения ряда // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Вып. 2 (32). С. 93–96.
7. Качановский Ф.В. Что происходит с кислотностью осадков, выпадающих в Твери? // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 2 (34). С. 90–94.

8. Качановский Ф.В. Характер динамики кислотности осадков, выпадающих в Твери // *Строительство и землеустройство: проблемы и перспективы развития: материалы Всероссийской научно-практической конференции*. Тверь: ТвГТУ, 2019. С. 59–65.
9. Качановский Ф.В. О кислотности осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 66–74.
10. Качановский Ф.В. Поведение кислотности осадков, выпавших в Твери в 1990–2020 гг. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2021. № 3 (11). С. 105–113.
11. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М, 1998. 528 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КАЧАНОВСКИЙ Феликс Вячеславович – доцент кафедры гидравлики, теплотехники и гидропривода, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: felix.kachanovsky@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Качановский Ф.В. Статистический анализ удлиняющегося ряда наблюдений за кислотностью осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 1 (17). С. 79–88.

STATISTICAL ANALYSIS OF OBSERVATIONS THE PRECIPITATIONS ACIDITY IN TVER

F.V. Kachanovsky

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Analysis had made of dynamics of the precipitation acidity (atmospheric precipitation had fallen in Tver in 1990–2022 years). Time series models of the indicator *pH* and her evolution were examined. Qubic model have considered as adequate. Trend, cyclic component and seasonal indices of the indicator *pH* preserved his character in spite of time series lengthening.

Keywords: acidity, acid rain, precipitation, model, time series, trend, cyclic component, seasonal component, residuals, indicator *pH*.

REFERENCES

1. Kachanovsky F.V. The dynamics of the acidity of precipitation in Tver (statistical analysis). *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2009. Iss. 15, pp. 199–203. (In Russian).
2. Kachanovsky F.V. Acidity of atmospheric precipitation in Tver (statistical analysis of dynamics). *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2012. Iss. 22, pp. 82–87. (In Russian).

3. Kachanovsky F.V. Relationship between the acidity of precipitation in Tver and air temperature. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2013. Iss. 2 (24), pp. 28–31. (In Russian).
4. Kachanovsky F.V. Relationship between the acidity of precipitation in Tver and their amount. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2015. Iss. 1 (27), pp. 34–39. (In Russian).
5. Kachanovsky F.V. Evolution of the trend and intra-annual dynamics of the acidity of precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2016. Iss. 2 (30), pp. 83–87. (In Russian).
6. Kachanovsky F.V. Changes in the estimates of the acidity of precipitation in Tver as a result of lengthening the series. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2017. Iss. 2 (32), pp. 93–96. (In Russian).
7. Kachanovsky F.V. What happens to the acidity of precipitation in Tver? *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*. 2018. Iss. 2 (34), pp. 90–94. (In Russian).
8. Kachanovsky F.V. The nature of the dynamics of the acidity of precipitation falling in Tver. *Construction and Land Management: Problems and Development Prospects: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Tver: TvGTU, 2019, pp. 59–65. (In Russian).
9. Kachanovsky F.V. On the acidity of precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himičeskie tehnologii»*. 2020. No. 2 (6), pp. 66–75. (In Russian).
10. Kachanovsky F.V. Behaviour of the precipitations acidity in Tver, 1990–2020 years. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himičeskie tehnologii»*. 2021. No. 3 (11), pp. 105–113. (In Russian).
11. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. *Statisticheskij analiz dannyh na komp'yutere* [Statistical analysis of data on a computer]. Moscow: INFRA-M, 1998. 528 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KACHANOVSKY Felix Vjacheslavovich – associate professor of the department of hydraulics, heat engineering and hydraulic drive, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. Statistical analysis of observations the precipitations acidity in Tver // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2023. No. 1 (17), pp. 79–88.

УДК 544.42

**ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЖЕЛЕЗА В КАТАЛИЗАТОРЕ
НА ПРОЦЕСС СИНТЕЗА ФИШЕРА – ТРОПША***М.Е. Маркова, А.А. Степачева**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Маркова М.Е., Степачева А.А., 2023

Аннотация. Изучено влияние концентрации железа в биметаллическом Fe-Ru катализаторе на процесс синтеза Фишера – Тропша (СФТ), конверсию СО и селективности продуктов. Сделан вывод, что наиболее активными в жидкофазном СФТ оказались каталитические системы с содержанием железа 2 и 3 масс. %. Найдено, что в присутствии выбранных каталитических систем конверсия СО составила 27 мольн. % за один проход, при этом селективность к жидким углеводородам C₅–C₁₁ превышала 95 мольн. %.

Ключевые слова: синтез-газ, синтез Фишера – Тропша, катализатор.

DOI: 10.46573/2658-7459-2023-1-89-96

ВВЕДЕНИЕ

Синтез Фишера – Тропша (СФТ) является одной из основных альтернатив ископаемому топливу [1, 2]. Преимуществом этого процесса выступает возможность получения чистого топлива без соединений серы и азота. Наиболее известные катализаторы, используемые в реакциях Фишера – Тропша, – это кобальт, рутений и железо [3]. Однако проблема с современными катализаторами СФТ заключается в достижении высокой селективности в отношении получения топливной фракции углеводородов, поэтому много усилий затрачивается на выбор методов синтеза, носителей, а также промоторов для улучшения реакционной способности катализаторов [4]. В последнее время большое внимание уделяется получению высокоактивных железных катализаторов [5, 6]. Увеличение активности катализатора и селективности обычно достигается путем изменения текстурных характеристик (например, диспергации частиц активной фазы) и стабилизации электронной структуры активного металла. Было показано, что использование рутениевых катализаторов в процессе СФТ для образования более тяжелых углеводородов не требует какой-либо модификации. Напротив, катализаторы на основе железа или кобальта требуют введения соответствующих промоторов. Обычно катализаторы на основе железа промотируются Ru, что изменяет электронные свойства этих систем [7]. Модификация железных катализаторов улучшает их активность и селективность. Это связано с увеличением хемосорбции СО при одновременном ингибировании хемосорбции водорода [7, 8].

В данной статье рассматривается влияние концентрации железа в катализаторе, модифицированном рутением, на его активность в процессе СФТ и на селективность к образованию жидких алканов бензиновой фракции.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методика синтеза катализаторов

Синтез катализаторов проводили в стальном реакторе высокого давления Parr-4307 (Parr Instrument, США); 1 г носителя, предварительно измельченного до размеров частиц не более 70 мкм, обработанного ацетоном и высушенного при 70 ± 2 °С, помещали в реактор. Туда же вносили 15 мл водного раствора, содержащего предварительно рассчитанные количества нитрата железа (III) и гидроксохлорида рутения (IV), и 0,1 г гидрокарбоната натрия. Реактор подвергали герметизации и трехкратно продували азотом для удаления воздуха. Реакционную смесь нагревали до температуры 200 °С в атмосфере азота при давлении 6 МПа. Конечное давление после нагрева 7,8 МПа. Процесс синтеза катализаторов занял 15 мин при рабочих условиях. После окончания синтеза катализатор отфильтровывали, промыли 10–20 мл дистиллированной воды (до исчезновения реакции на хлорид- и нитрат-ионы), сушили при 70 ± 2 °С. Катализаторы восстанавливали в токе водорода при температуре 300 °С.

В качестве носителя использовался сверхсшитый полистирол (СПС) нефункционализированный MN-270.

Методика СФТ

Эксперименты проводились в стальном реакторе, упомянутом выше, в присутствии додекана (растворителя). В качестве синтез-газа использовалась смесь CO и H₂ в объемном соотношении 1:4. Температура процесса составляла 225 °С, общее давление в реакторе – 2 МПа. Жидкую фазу анализировали методом газовой хроматографии масс-спектрометрии с применением газового хроматографа GC-2010 и масс-спектрометра GCMS-QP2010S (Shimadzu, Япония). Анализ газовой фазы проводился методом газовой хроматографии с использованием газового хроматографа «Кристалюкс-4000». Количественное определение компонентов реакционной среды осуществлялось с учетом калибровочных графиков и внешнего стандарта.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки влияния концентрации железа в биметаллических каталитических системах, синтезированных совместным осаждением в среде субкритической воды, были протестированы образцы 1%Fe-1%Ru-СПС-СВ, 2%Fe-1%Ru-СПС-СВ, 3%Fe-1%Ru-СПС-СВ, 5%Fe-1%Ru-СПС-СВ и 10%Fe-1%Ru-СПС-СВ. Полученные кинетические кривые влияния концентрации железа в катализаторах на конверсию CO и образование CH₄ представлены на рис. 1.

Можно отметить, что изменение концентрации железа в катализаторе практически не оказывает влияния на механизм конверсии CO, но изменяет их активность и распределение продуктов реакции. Так, для катализаторов с содержанием железа 2 и 3 масс. % отмечена высокая степень конверсии CO, но при этом скорость образования метана также увеличивается. Катализатор с содержанием железа 1 масс. % показывает активность, которая несколько ниже, чем у 2%Fe-1%Ru-СПС-СВ. Предположительно, полученные результаты обусловлены малой концентрацией активных центров железа на поверхности носителя. Кривые образцов 5%Fe-1%Ru-СПС-СВ и 10%Fe-1%Ru-СПС-СВ также демонстрируют слабую активность в процессе СФТ по сравнению с 2%Fe-1%Ru-СПС-СВ и 3%Fe-1%Ru-СПС-СВ, что может быть объяснено уменьшением доступности активных центров железа из-за образования крупных агломератов Fe₃O₄ и низкого соотношения Fe-Ru на поверхности носителя.

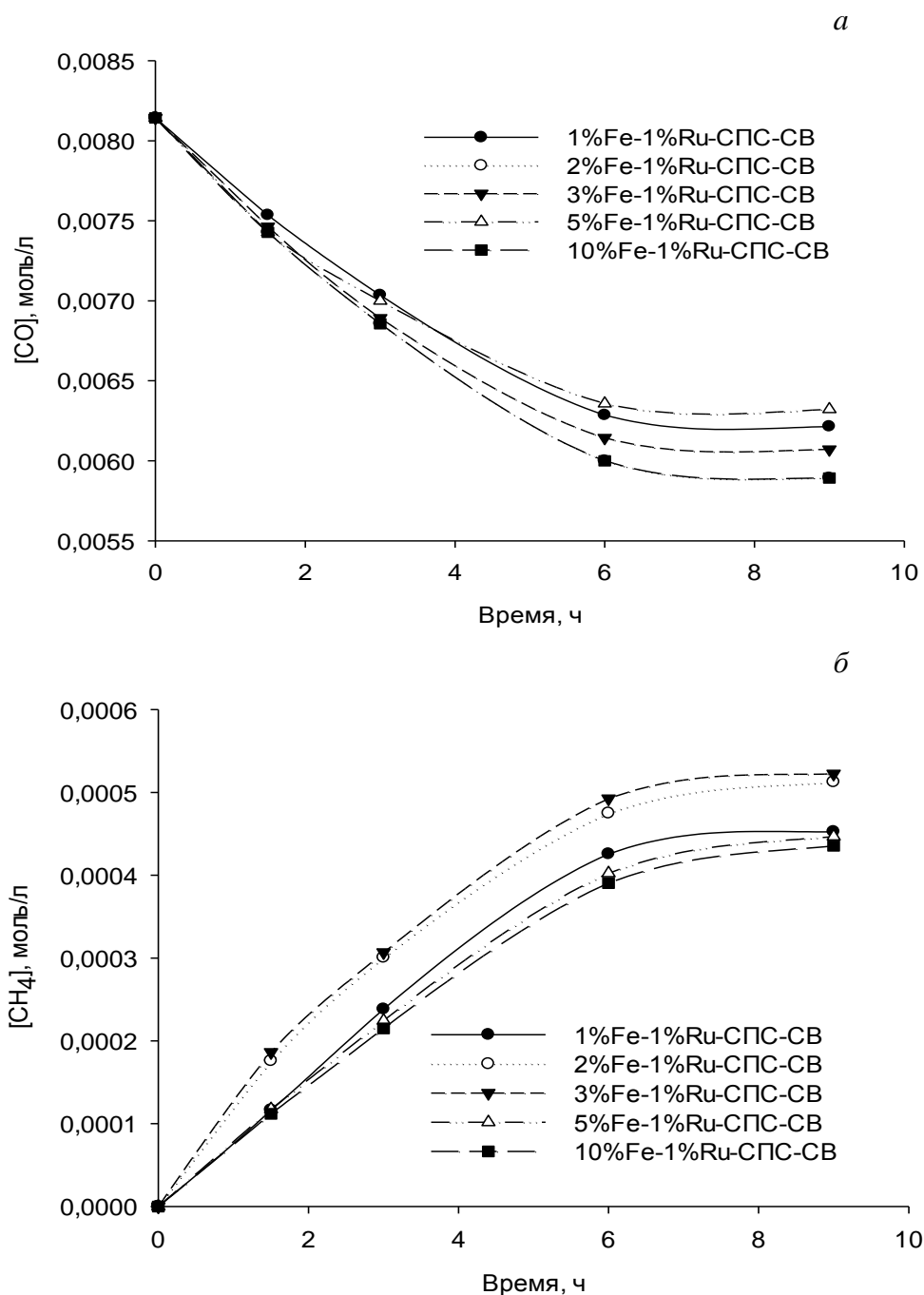


Рис. 1. Кинетические кривые влияния концентрации железа в катализаторах на расходование CO (*a*) и образование метана (*б*)

Для анализа кинетических кривых и определения относительной активности катализаторов была проведена линейная трансформация кинетических кривых (рис. 2) и рассчитан коэффициент трансформации (табл. 1). Наибольшая активность в конверсии CO отмечена для катализатора 2%Fe-1%Ru-СПС-СВ. Этот же катализатор показывает более высокое значение конверсии CO по сравнению с остальными исследуемыми системами.

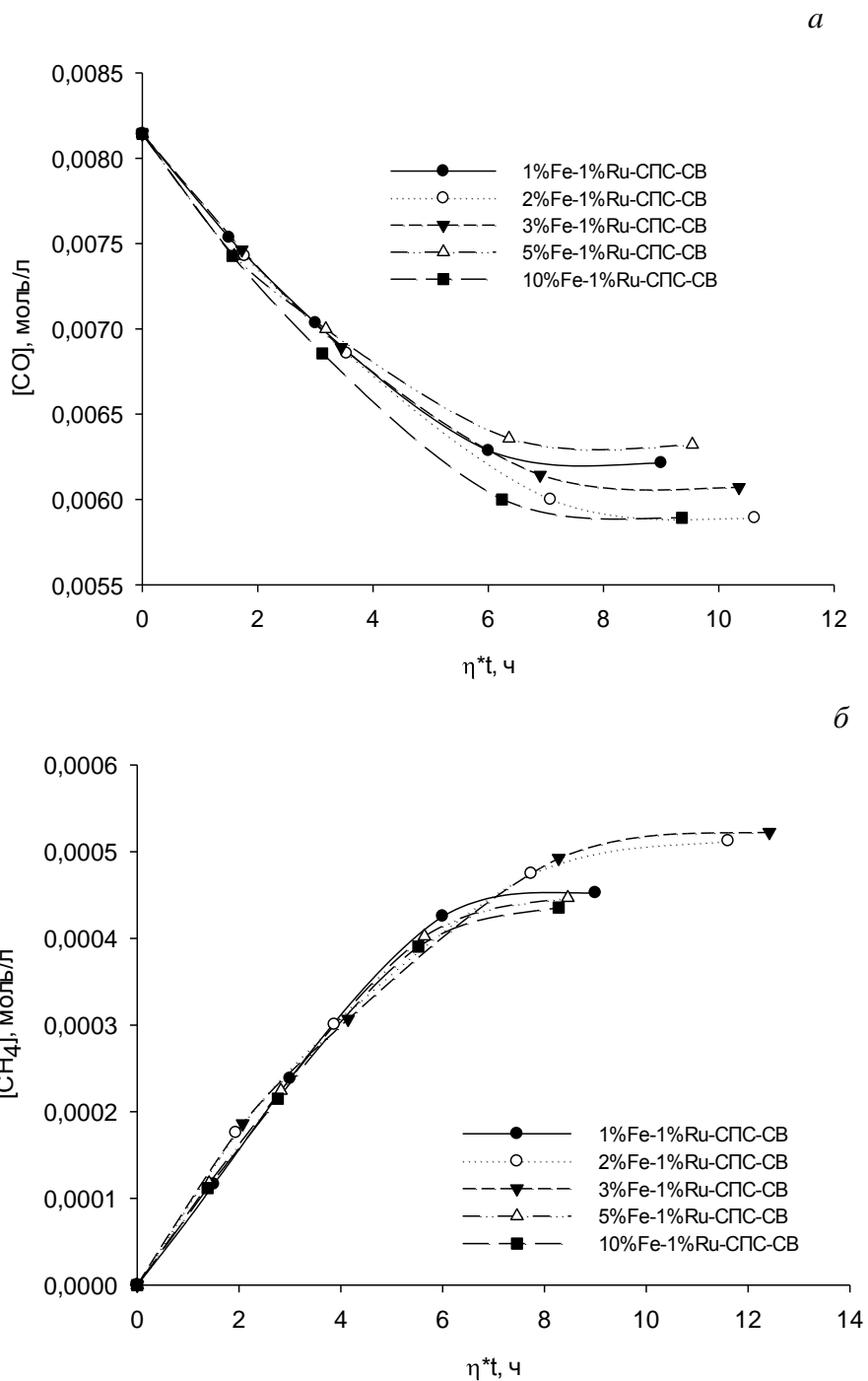


Рис. 2. Линейное преобразование кинетических кривых расхода CO (а) и образования метана (б) в присутствии катализаторов с различным содержанием железа

Таблица 1

Коэффициенты трансформации зависимостей конверсии СО и образования метана от концентрации железа в катализаторах

Образец	Коэффициент трансформации $\eta(\text{CO})$	Коэффициент трансформации $\eta(\text{CH}_4)$	Максимальная конверсия СО, %
1%Fe-1%Ru-СПС-СВ	1,00	1,00	23,68
2%Fe-1%Ru-СПС-СВ	1,18	1,29	27,63
3%Fe-1%Ru-СПС-СВ	1,15	1,38	25,44
5%Fe-1%Ru-СПС-СВ	1,06	0,94	22,37
10%Fe-1%Ru-СПС-СВ	1,04	0,92	22,37

Для большей наглядности были построены кривые зависимости относительной активности от концентрации железа в катализаторах (рис. 3). Видно, что кривые проходят через максимум, что, вероятно, связано с особенностями структуры и доступности каталитически активных центров, формируемых при изменении концентрации активных металлов.

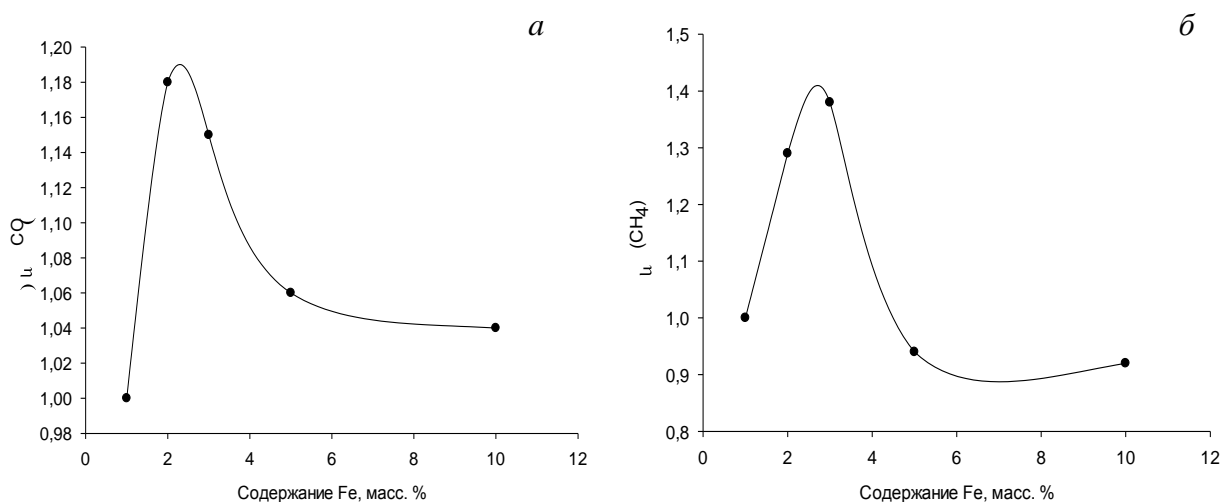


Рис. 3. Кривые зависимости коэффициентов трансформации для СО (а) и метана (б) от концентрации железа в катализаторах

Увеличение концентрации железа приводит к росту селективности по отношению к кислородсодержащим продуктам (простым и сложным эфирам с числом атомов углерода 2–6) (табл. 2). Это дает возможность предположить, что указанные продукты формируются в основном на железосодержащих активных центрах. Катализатор 1%Fe-1%Ru-СПС-СВ также показывает суммарные селективности, близкие к тем, что наблюдались в присутствии рутениевого катализатора без железосодержащей фазы.

Таблица 2

Селективность СФТ по группам продуктов в присутствии катализаторов с различным содержанием железа

Катализатор	Селективность, мольн. %					
	CH ₄	C ₂ –C ₄	C ₅ –C ₁₁	C ₁₃ –C ₁₄	Оксигенаты C ₁ –C ₅	Циклические и ароматические
1%Fe-1%Ru-СПС-СВ	0,1	0,3	94,4	2,3	0,1	2,8
2%Fe-1%Ru-СПС-СВ	0,7	3,3	95,8	0,0	0,1	0,1
3%Fe-1%Ru-СПС-СВ	1,0	4,0	94,8	0,0	0,1	0,1
5%Fe-1%Ru-СПС-СВ	0,1	4,4	89,7	0,0	5,7	0,1
10%Fe-1%Ru-СПС-СВ	0,1	4,2	89,4	0,0	6,2	0,1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных данных можно сделать вывод, что наиболее активными в жидкофазном СФТ являются каталитические системы с содержанием железа 2 и 3 масс. %. Однако скорость образования нежелательного побочного продукта – метана – на образце 3%Fe-1%Ru-СПС-СВ выше, чем на образце 2%Fe-1%Ru-СПС-СВ. Увеличение концентрации железа также приводит к росту селективности по отношению к продуктам, содержащим кислород. При снижении концентрации железа (отклонении от оптимального значения) наблюдается формирование длинноцепочечных алаканов, что не всегда благоприятно, так как может приводить к потере каталитической активности вследствие уменьшения количества доступных активных центров и закоксовывания поверхности катализатора.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках Стипендии Президента РФ (СП-4822.2022.1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chalupka K.A., Maniukiewicz W., Mierczynski P., Maniecki T., Rynkowski J., Dzwigaj S. The catalytic activity of Fe-containing SiBEA zeolites in Fischer – Tropsch synthesis // *Catalysis Today*. 2015. Vol. 257. Pp. 117–121.
2. Mierczynski P., Dawid B., Maniukiewicz W., Mosinska M., Zakrzewski M., Ciesielski R., Kedziora A., Dubkov S., Gromov D., Rogowski J., Witonska I., Szyrkowska M.I., Maniecki T. Fischer – Tropsch synthesis over various Fe/Al₂O₃–Cr₂O₃ catalysts // *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2018. Vol. 124. Pp. 545–561.
3. Zhu C., Bollas G.M. Gasoline selective Fischer – Tropsch synthesis in structured bifunctional catalysts // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2018. Vol. 235. Pp. 92–102.
4. Park J.C., Jang S., Rhim G.B., Lee J.H., Choi H., Jeong H.-D., Youn M.H., Lee D.-W., Koo K.Y., Kang S.W., Yang J.-I., Lee H.-T., Jung H., Kim C.S., Chun D.H. A durable nanocatalyst of potassium-doped iron-carbide/alumina for significant production of linear alpha olefins via Fischer – Tropsch synthesis // *Applied Catalysis A: General*. 2018. Vol. 564. Pp. 190–198.
5. Wang D., Chen B., Duan X., Chen D., Zhou X. Iron-based Fischer – Tropsch synthesis of lower olefins: the nature of χ -Fe₅C₂ catalyst and why and how to introduce promoters // *Journal of Energy Chemistry*. 2016. Vol. 25. Pp. 911–916.

6. Cheng K., Ordonsky V.V., Virginie M., Legras B., Chernavskii P.A., Kazak V.O., Cordier C., Paul S., Wang Y., Khodakov A.Y. Support effects in high temperature Fischer – Tropsch synthesis on iron catalysts // *Applied Catalysis A: General*. 2014. Vol. 488. Pp. 66–77.
7. Bahome M.C., Jewell L.L., Padayachy K., Hildebrandt D., Glasser D., Datye A.K., Coville N.J. Fe-Ru small particle bimetallic catalysts supported on carbon nanotubes for use in Fischer – Tropsch synthesis // *Applied Catalysis A: General*. 2007. Vol. 328. Pp. 243–351.
8. Barrios A.J., Gu B., Luo Y., Peron D.V., Chernavskii P.A., Virginie M., Wojcieszak R., Thybaut J.W., Ordonsky V.V., Khodakov A.Y. Identification of efficient promoters and selectivity trends in high temperature Fischer – Tropsch synthesis over supported iron catalysts // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2020. Vol. 273. Article 119028.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАРКОВА Мария Евгеньевна – кандидат химических наук, преподаватель кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

СТЕПАЧЕВА Антонина Анатольевна – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: a.a.stepacheva@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Маркова М.Е., Степачева А.А. Влияние концентрации железа в катализаторе на процесс синтеза Фишера – Тропша // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2023. № 1 (17). С. 89–96.

EFFECT OF IRON CONCENTRATION IN THE CATALYST ON THE FISCHER – TROPSCH SYNTHESIS

M.E. Markova, A.A. Stepacheva
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The effect of iron concentration in a bimetallic Fe-Ru catalyst on the Fischer – Tropsch synthesis (FTS) process, CO conversion and product selectivity has been studied. It is concluded that the catalytic systems with an iron content of 2 and 3 wt. % were found to be the most active in liquid-phase FTS. It was revealed, that CO conversion was calculated as 27 mol. % for one cycle in the presence of the chosen catalytic systems. In this case, the selectivity toward C₅–C₁₁ liquid hydrocarbons exceeded 95 mol. %.

Keywords: synthesis gas, Fischer – Tropsch synthesis, catalysts.

REFERENCES

1. Chalupka K.A., Maniukiewicz W., Mierczynski P., Maniecki T., Rynkowski J., Dzwigaj S. The catalytic activity of Fe-containing SiBEA zeolites in Fischer – Tropsch synthesis. *Catalysis Today*. 2015. Vol. 257, pp. 117–121.
2. Mierczynski P., Dawid B., Maniukiewicz W., Mosinska M., Zakrzewski M., Ciesielski R., Kedziora A., Dubkov S., Gromov D., Rogowski J., Witonska I., Szykowska M.I., Maniecki T.

- Fischer – Tropsch synthesis over various Fe/Al₂O₃–Cr₂O₃ catalysts. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*. 2018. Vol. 124, pp. 545–561.
3. Zhu C., Bollas G.M. Gasoline selective Fischer – Tropsch synthesis in structured bifunctional catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2018. Vol. 235, pp. 92–102.
4. Park J.C., Jang S., Rhim G.B., Lee J.H., Choi H., Jeong H.-D., Youn M.H., Lee D.-W., Koo K.Y., Kang S.W., Yang J.-I., Lee H.-T., Jung H., Kim C.S., Chun D.H. A durable nanocatalyst of potassium-doped iron-carbide/alumina for significant production of linear alpha olefins via Fischer – Tropsch synthesis. *Applied Catalysis A: General*. 2018. Vol. 564, pp. 190–198.
5. Wang D., Chen B., Duan X., Chen D., Zhou X. Iron-based Fischer – Tropsch synthesis of lower olefins: the nature of χ -Fe₅C₂ catalyst and why and how to introduce promoters. *Journal of Energy Chemistry*. 2016. Vol. 25, pp. 911–916.
6. Cheng K., Ordonsky V.V., Virginie M., Legras B., Chernavskii P.A., Kazak V.O., Cordier C., Paul S., Wang Y., Khodakov A.Y. Support effects in high temperature Fischer-Tropsch synthesis on iron catalysts. *Applied Catalysis A: General*. 2014. Vol. 488, pp. 66–77.
7. Bahome M.C., Jewell L.L., Padayachy K., Hildebrandt D., Glasser D., Datye A.K., Coville N.J. Fe-Ru small particle bimetallic catalysts supported on carbon nanotubes for use in Fischer – Tropsch synthesis. *Applied Catalysis A: General*. 2007. Vol. 328, pp. 243–351.
8. Barrios A.J., Gu B., Luo Y., Peron D.V., Chernavskii P.A., Virginie M., Wojcieszak R., Thybaut J.W., Ordonsky V.V., Khodakov A.Y. Identification of efficient promoters and selectivity trends in high temperature Fischer – Tropsch synthesis over supported iron catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2020. Vol. 273. Article 119028.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

MARKOVA Mariia Evgenievna – candidate of chemical sciences, lecturer of the department of biotechnology, chemistry and standardization, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

STEPACHEVA Antonina Anatolyevna – candidate of chemical sciences, associate professor, associate professor of the department of biotechnology, chemistry and standardization, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.
E-mail: a.a.stepacheva@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Markova M.E., Stepacheva A.A. Effect of iron concentration in the catalyst on the Fischer – Tropsch synthesis // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 1 (17), pp. 89–96.

**Вестник Тверского
государственного технического
университета. Серия
«Строительство. Электротехника
и химические технологии»**

Учредитель и издатель: ФГБОУ ВО «Тверской государственный
технический университет»

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

Тел. редакции: +7 (4822) 78-89-00. **E-mail:** common@tstu.tver.ru

Главный редактор

Гультияев В.И. – д.т.н., доцент ТвГТУ

Ответственный секретарь

Новиченкова Т.Б. – к.т.н., доцент ТвГТУ

Члены редакционной коллегии:

Алиферов А.И. – д.т.н., профессор НГТУ

Белов В.В. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Березовский Н.И. – д.т.н., профессор Белорусского национального технического
университета, г. Минск, Республика Беларусь

Болотов А.Н. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Бронштейн Л.М. – к.х.н., с.н.с., химический факультет Индианского универси-
тета, Блумингтон, США

Ковалев К.Л. – д.т.н., профессор МАИ

Корнеев К.Б. – к.т.н., доцент ТвГТУ

Косивцов Ю.Ю. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Макаров А.Н. – д.т.н., профессор ТвГТУ

Матар П.Ю. – к.т.н., HDR, профессор Ливанского университета, Бейрут, Ливан

Матвеева В.Г. – д.х.н., профессор ТвГТУ

Назарова М.Ю. – д.т.н., профессор НИУ БелГУ

Петропавловская В.Б. – д.т.н., доцент ТвГТУ

Самченко С.В. – д.т.н., профессор НИУ МГСУ

Севастьянов А.А. – к.т.н., доцент НГТУ им. Р.Е. Алексева

Сульман М.Г. – д.х.н., профессор ТвГТУ

Трещев А.А. – д.т.н., профессор ТулГУ

Чернышева Н.В. – д.т.н., профессор БГТУ им. В.Г. Шухова

Шифрина З.Б. – д.х.н., заведующая лабораторией макромолекулярной химии,
Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН

Ясинская Н.Н. – д.т.н., доцент Витебского государственного технологического
университета, г. Витебск, Республика Беларусь

**ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал
№ 1(17), 2023

Редактор Ю.А. Якушева

Корректор Я.А. Петрова

Дата выхода в свет 13.09.2023

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
Адрес издателя: 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22