

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

№ 3 (15), 2022

Тверь 2022

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2022. № 3 (15). 102 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: 0.1.5 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: ПИ № ФС77-74328 (печатн.) от 19 ноября 2018 г., Эл № ФС77-74949 (онлайн) от 25 января 2019 г.

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

ISSN 2658-7459 (печатн.)

ISSN 2686-794X (онлайн)

СОДЕРЖАНИЕ**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

<i>Баркая Т.Р., Субботин С.Л., Гавриленко А.В., Казимиров С.И.</i> Особенности моделирования железобетонных элементов при поэтапном создании постнапряжения.....	5
<i>Белов В.В., Баркая Т.Р., Куляев П.В.</i> Влияние комплексной добавки на ползучесть мелкозернистого карбонатного бетона.....	11
<i>Косивцов Ю.Г., Гультияев В.И.</i> Способ быстрого определения весовой влажности песка для корректирования состава бетона.....	22
<i>Левиков А.В.</i> Особенности применения часторебристых сборно-монолитных перекрытий в современном домостроении.....	26

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Качановский Ф.В.</i> Применение пакета компьютерной алгебры при решении учебных задач по термодинамике.....	33
<i>Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Осеи-Овусу Р.</i> Алгоритмические модели управления электрической нагрузкой в системах электроснабжения.....	40
<i>Макаров А.Н.</i> Основные положения открытых в России (в ТвГТУ) законов теплового излучения газовых объемов электрических дуг и факелов.....	50
<i>Маринова С.В.</i> Повышение точности прогноза электропотребления промышленного предприятия, имеющего собственную генерацию.....	59
<i>Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А.</i> О понятии n -симметрии пространственного тела.....	66

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Верес К.А., Усов В.В., Ильин А.А., Кочетков С.П.</i> Влияние степени гидратации MgO на свойства Zn-Mg поглотителя сероводорода.....	73
<i>Качановский Ф.В.</i> Результаты очередного удлинения ряда наблюдений за кислотностью осадков, выпадающих в Твери.....	83
<i>Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р.</i> Оценка уровня накопления тяжелых металлов в донных отложениях.....	94

CONTENTS**CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**

<i>Barkaya T.R., Subbotin S.L., Gavrilenko A.V., Kazimirov S.I.</i> Bending test of a metal-wood panel with flat galvanized sheet walls stiffened by wooden ribs.....	5
<i>Belov V.V., Barkaya T.R., Kulyaev P.V.</i> Effect of complex additive on creep of fine-grained carbonate concrete.....	11
<i>Kosivtsov Yu.G., Gulyaev V.I.</i> A method for quickly determining the weight humidity sand for correcting the composition of concrete.....	22
<i>Levikov A.V.</i> Features of application of frequently ribbed prefabricated-monolithic floors in modern house-building.....	26

ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Kachanovsky F.V.</i> Application of a computer algebra package for solving of technical thermodynamic problems.....	33
<i>Korneev K.B., Pavlova Yu.M., Osei-Ovusu R.</i> Algorithmic models of electric load control in power supply systems.....	40
<i>Makarov A.N.</i> The main provisions of the laws of thermal radiation of gas volumes of electric arcs and torches discovered in Russia (in TvSTU).....	50
<i>Marinova S.V.</i> Improving the accuracy of power consumption forecast of industrial enterprise with its own generation.....	59
<i>Shum A.I.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A.</i> On the concept of n -symmetry of a spatial body.....	66

CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Veres K.A., Usov V.V., Ilyin A.A., Kochetkov S.P.</i> Influence of MgO hydration degree on properties of Zn-Mg hydrogen sulfide absorb.....	73
<i>Kachanovsky F.V.</i> Results of ordinary lengthening observations the precipitation's acidity in Tver.....	83
<i>Ivanov G.N., Krivenko I.V., Smirnova M.A., Ispiryayev S.R.</i> Estimation the level of accumulation heavy metals in bottom sediments.....	94

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 692.522.2

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
ПРИ ПОЭТАПНОМ СОЗДАНИИ ПОСТНАПРЯЖЕНИЯ***Т.Р. Баркая¹, С.Л. Субботин¹, А.В. Гавриленко¹, С.И. Казимиров²*¹ *Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*² *ООО КБ «Калинин» (г. Тверь)*© Баркая Т.Р., Субботин С.Л.,
Гавриленко А.В., Казимиров С.И., 2022

Аннотация. Рассмотрены особенности моделирования постнапряженных конструкций, возводимых с применением поэтапного натяжения монострендов. Указано, что разделение расчетного усилия обжатия на этапы производится для сокращения сроков оборачиваемости опалубки и более полного использования механических свойств арматурных канатов за счет раннего включения в работу бетона и компенсации потерь напряжения первого этапа. Сделан вывод: в результате того, что на бетон, не достигший проектной прочности и деформативности, действует как собственный вес, так и монтажные нагрузки, конструкция приобретает начальные деформации (прогиб), которые по окончании твердения сохраняются в ней, следовательно, на этапе вторичного обжатия (а тем более к моменту загрузки эксплуатационной нагрузкой) элемент уже имеет некоторые геометрические несовершенства. Отмечено, что возникает вопрос об учете этого фактора при составлении расчетных схем постнапряженных конструкций и влиянии начального напряженного состояния на распределение усилий в элементе.

Ключевые слова: железобетон, монолитный бетон, постнапряжение, арматура без сцепления, моностренд, геометрическая нелинейность, выдерживание бетона.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-3-5-11

Технология предварительного напряжения монолитных конструкций с упором на бетон позволяет прикладывать к ним усилие обжатия в несколько этапов. Одним из распространенных способов проведения работ является приложение усилия обжатия в два этапа. На первом этапе к напрягаемой конструкции прикладывается усилие, составляющее порядка 25–60 % от полного, заданного в проекте. При этом конструкция приобрела уровень несущей способности и жесткости, необходимый для демонтажа части стоек опалубки и использования этих стоек на другой захватке. В то же время в конструкции начинают развиваться потери предварительного напряжения, обусловленные ползучестью бетона. Интенсивность этих потерь наиболее существенна в первые часы и дни после приложения обжатия.

Второй этап преднапряжения имеет место через несколько дней после первого, то есть когда бетон набрал достаточную прочность, в том числе и на действие местных нагрузок [3–5]. К конструкции прикладывается полное усилие обжатия, причем успевшие возникнуть потери преднапряжения частично компенсируются. После завершения натяжения канатов на втором этапе конструкция приобретает достаточные для восприятия собственного веса и технологических нагрузок (перемещения рабочих, кратковременного размещения материалов и инструментов) несущую способность и жесткость. Опалубка окончательно демонтируется.

Применение технологии предварительного напряжения, включающей приложение обжимающего усилия в два этапа, позволяет ускорить процесс производства работ, уменьшить требуемое количество стоек переопирания, более полно использовать свойства арматуры и бетона, компенсировать часть вторых потерь. Данному подходу присущи и определенные сложности. В частности, после приложения первой части усилия обжатия и сохранения ряда стоек переопирания конструкция под действием собственного веса и технологических нагрузок может получить некоторый прогиб. Далее бетон конструкции набирает прочность и образовавшийся начальный прогиб фиксируется, вследствие чего получается плита или балка, имеющая начальные несовершенства. При дальнейшем приложении второй части усилия обжатия результирующий изгибающий момент в конструкции необходимо подсчитывать с учетом поправки на ее начальный прогиб.

При составлении расчетных схем рассматриваемых конструкций одним из распространенных способов моделирования преднапряжения выступает введение условных вывешивающих нагрузок [6, 7]. Как правило, при этом этапность создания обжатия и сопутствующее этому развитие деформированного состояния, изменение геометрии схемы не учитываются. При этом может возникать некоторая взаимная компенсация продольного изгиба и вывешивающей нагрузки. В рамных каркасах с жестким сопряжением балок и колонн сочетание небольших начальных деформаций и обжатия второго этапа не сможет существенно повлиять (что очевидно) на результат расчета, выполненного без учета фактической нелинейности. Однако в общем случае (например, для неполных (безбалочных) монолитных каркасов или при шарнирном опирании плиты на кирпичную стену) влияние начального несовершенства может оказаться более значительным. В данной работе представлен анализ достоверности указанного подхода с целью решения задачи для произвольной изогнутой оси балки при малых прогибах.

Рассматриваемая железобетонная балка с прямолинейным расположением моностренда изображена на рис. 1 и 2. Расчетная схема соответствует нагружению балки на втором этапе постнапряжения с приобретенным прогибом f и под воздействием усилия обжатия второго этапа. Подразумевается, что моностренды в балке расположены в плоскости yOz так, что вывешивающие силы на первом этапе преднапряжения отсутствуют (рис. 1).

На балку действуют сжимающая сила, сжимающая сила, действующая на втором этапе, N и дополнительная вывешивающая сила $q = w_f$, образовавшаяся в результате прогиба и увеличения кривизны каната. Поскольку угол φ_0 невелик, можно считать, что

$$\sin(\varphi_0) = \varphi_0; \quad \cos(\varphi_0) = 1; \quad \operatorname{tg}(\varphi_0) = \varphi_0.$$

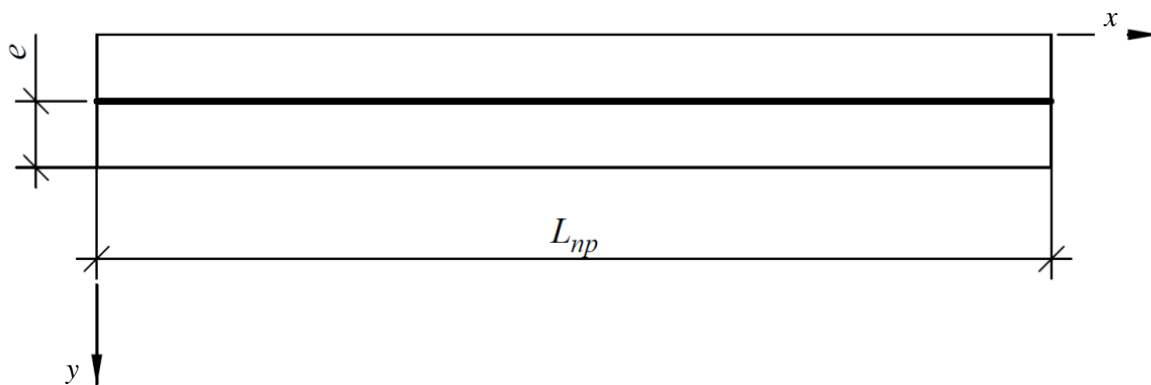
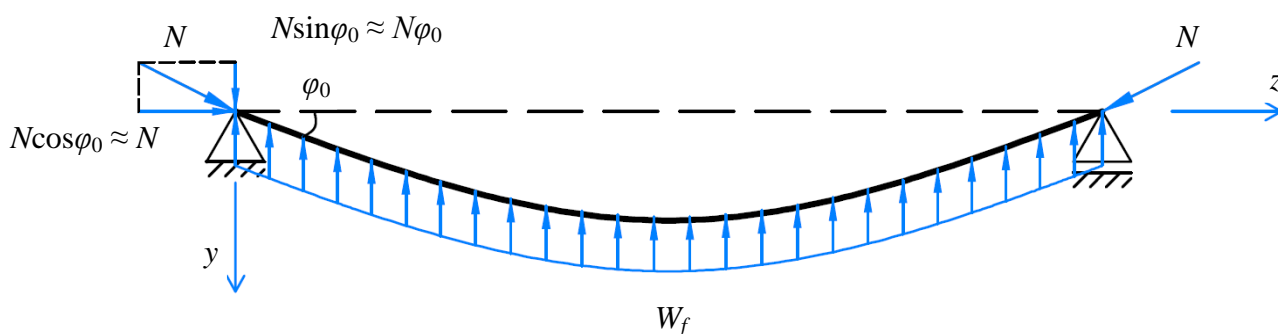
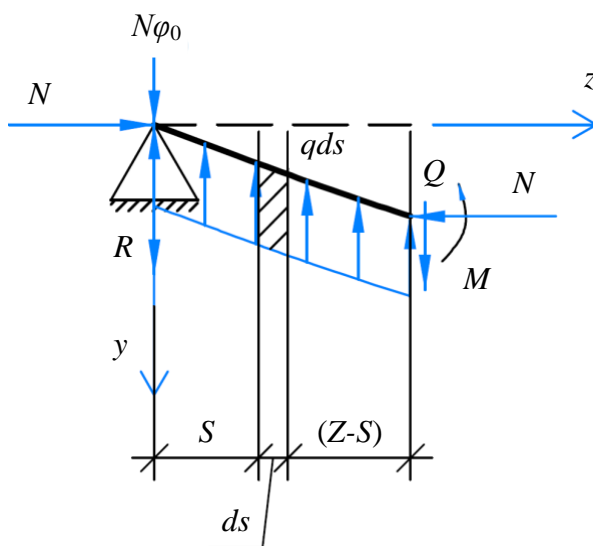


Рис. 1. Балка с прямолинейным расположением монострендов



а



б

Рис. 2. Расчетная схема постнатянутой балки на втором этапе обжатия:
а – деформированное состояние и воздействия на момент нагружения;
б – к определению опорных реакций

Принимается также, что длина некоторого участка деформированной балки z равна своей проекции на ось недеформированной балки. Исходя из вышеизложенного, опорную реакцию (см. рис. 2б) находим по формуле

$$R + N \cdot \varphi_0 = \frac{1}{2} \int_0^l q(z) dz. \quad (1)$$

Интеграл в правой части выражения (1) вычисляем с учетом, что

$$q(z) = -N \frac{d^2 v}{dz^2}. \quad (2)$$

Равенство (1) с учетом (2) преобразуем к виду

$$\begin{aligned} R + N \cdot \varphi_0 &= \frac{1}{2} \int_0^l q(z) dz = \frac{1}{2} \int_0^l (-N \frac{d^2 v}{dz^2}) dz = -\frac{N}{2} \int_0^l \frac{d^2 v}{dz^2} dz = \\ &= -\frac{N}{2} \frac{dv}{dz} \Big|_0^l = -\frac{N}{2} \left(\frac{dv}{dz} \Big|_{z=l} - \frac{dv}{dz} \Big|_{z=0} \right) = -\frac{N}{2} (-\varphi_0 - \varphi_0) = N \varphi_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Сопоставление выражений (3) и (1) показывает, что $R = 0$. Таким образом, опорная реакция R отсутствует, вертикальная составляющая силы обжатия компенсируется вывешивающими силами.

Изгибающий момент в произвольном поперечном сечении записывается с учетом уравнений (1)–(3):

$$\begin{aligned} M(z) &= Nv(z) - (R + N\varphi_0)z + \int_0^z q(s)(z-s)ds = Nv(z) - N\varphi_0z + \\ &+ z \int_0^z q(s)ds - \int_0^z q(s)sds = Nv(z) - N\varphi_0z + \\ &+ z \int_0^z -N \frac{d^2 v}{dz^2} dz - \int_0^z -N \frac{d^2 v(s)}{ds^2} sds = \\ &= Nv(z) - N\varphi_0z - Nz \frac{dv}{dz} \Big|_0^z + N \int_0^z \frac{d^2 v(s)}{ds^2} sds. \end{aligned} \quad (4)$$

Последнее слагаемое в выражении (4) (интеграл $\int_0^z \frac{d^2 v(s)}{ds^2} sds$) вычисляем с помощью метода «по частям»:

$$\begin{aligned} \int_0^z \frac{d^2 v(s)}{ds^2} sds &= \frac{dv}{ds} s \Big|_0^z - \int_0^z \frac{dv}{ds} ds = \\ &= \frac{dv}{dz} z - \frac{dv}{dz} \cdot 0 - v(s) \Big|_0^z = \frac{dv}{dz} z - v(z). \end{aligned} \quad (5)$$

Подстановка выражения (5) в (4) показывает, что суммарный изгибающий момент от совместного действия продольного изгиба и вывешивающей нагрузки равен нулю:

$$m(z) = Nv(z) - N\varphi_0 z - Nz \frac{dv(z)}{dz} + N\varphi_0 z + N \frac{dv(z)}{dz} z - Nv(z) = 0. \quad (6)$$

Полученный в равенстве (6) результат позволяет сделать вывод, что в элементах, не воспринимающих значительные продольные нагрузки (помимо усилий обжатия), с начальным прямолинейным расположением моностренда учет влияния прогиба при совместном действии силы обжатия N и вывешивающей нагрузки является излишним.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cross E. Post-tensioning in building structures. 2017. URL: <https://studylib.net/doc/18487085/post-tensioning-in-building-structures> (дата обращения: 14.02.2022).
2. Meyer K.T. When should you stress a cable slab // *MLAW Newletter*. 2006. URL: <https://mlaweng.com/newsletters/whenshould-you-stress-a-cable-slab> (дата обращения: 14.02.2022).
3. Баркая Т.Р., Гавриленко А.В., Левиков А.В., Шевкина А.В. Учет стадийности возведения при проектировании монолитных постнатяженных конструкций // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 4 (12). С. 19–23.
4. Абдуллина Ю.Р., Баркая Т.Р., Гавриленко А.В., Куляев П.В. Оптимизация технологических процессов постнатяжения в построечных условиях // *Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура*. 2020. № 4 (15). С. 16–22.
5. Aalami V.O. Post-Tensioned Buildings. Design and Construction. ADAPT Corporation. 2014. 202 p.
6. Портаев Д.В. Расчет и конструирование монолитных преднапряженных конструкций гражданских зданий. М.: Ассоциация строительных вузов. 2011. 248 с.
7. ТКП EN 1992-1-1-2009. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. 2010. 191 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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
СУББОТИН Сергей Львович – доктор технических наук, профессор кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sbtn@yandex.ru
ГАВРИЛЕНКО Алексей Владимирович – старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: GavrilenkoAV@tstu.tver.ru
КАЗИМИРОВ Сергей Игоревич – инженер-проектировщик, ООО КБ «Калинин», Россия, г. Тверь, ул. Новая Заря, д. 8, оф. II. E-mail: kazimirow97@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Баркая Т.Р., Субботин С.Л., Гавриленко А.В., Казимиров С.И. Особенности моделирования железобетонных элементов при поэтапном создании постнапряжения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 3 (15). С. 5–11.

BENDING TEST OF A METAL-WOOD PANEL WITH FLAT GALVANIZED SHEET WALLS STIFFENED BY WOODEN RIBS

T.R. Barkaya¹, S.L. Subbotin¹, A.V. Gavrilenko¹, S.I. Kazimirov²

¹ *Tver State Technical University (Tver)*

² *KB «Kalinin», LLC (Tver)*

Abstract. The features of modeling post-stressed structures erected using phased tension of monostrends are considered. It is indicated that the separation of the calculated compression force into stages is carried out to reduce the time of the formwork turnover and more fully utilize the mechanical properties of reinforcing ropes due to the early inclusion of concrete in the work and compensation for the stress losses of the first stage. The conclusion is made: as a result of the fact that both its own weight and mounting loads act on concrete that has not reached the design strength and deformability, the structure acquires initial deformations (deflection), which, after hardening, remain in it, therefore, at the stage of secondary compression (and even more so by the time of loading with an operational load) the element already has some geometric nonlinearity. It is noted that the question arises about taking this factor into account when drawing up design schemes of post-stressed structures and the influence of the initial stress state on the distribution of forces in the element.

Keywords: reinforced concrete, monolithic concrete, post-stress, reinforcement without coupling, monostrend, geometric nonlinearity, concrete retention.

REFERENCES

1. Cross E. Post-tensioning in building structures. 2017. URL: <https://studylib.net/doc/18487085/post-tensioning-in-building-structures> (accessed: 14.02.2022).
2. Meyer K.T. When should you stress a cable slab? *MLAW Newsletter*. 2006. URL: <https://mlaweng.com/newsletters/whenshould-you-stress-a-cable-slab> (accessed: 14.02.2022).
3. Barkaya T.R., Gavrilenko A.V., Levikov A.V., Shevkina A.V. Consideration of erection stage in designing monolithic post-strained structures. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskiye tekhnologii»*. 2021. No. 4 (12), pp. 19–26. (In Russian).
4. Abdullina Yu.R., Barkaya T.R., Gavrilenko A.V., Kulyaev P.V. Optimization of post-stress technological processes in building conditions. *Zhilishchnoe hozyajstvo i kommunal'naya infrastruktura*. 2020. No. 4 (15), pp. 16–22. (In Russian).
5. Aalami B.O. Post-Tensioned Buildings. Design and Construction. ADAPT Corporation. 2014. 202 p.

6. Portaev D.V. Raschet i konstruirovaniye monolitnyh prednapryazhennyh konstrukcij grazhdanskih zdaniy [Calculation and construction of monolithic prestressed structures of civil buildings]. Moscow: Associaciya stroitel'nyh vuzov. 2011. 248 p.
7. ТКР EN 1992-1-1-2009. Yevrokod 2. Proyektirovaniye zhelezobetonnykh konstruktsiy. Chast' 1-1. Obshchiye pravila i pravila dlya zdaniy [TCH EN 1992-1-1-2009. Eurocode 2. Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings]. Minsk: Ministerstvo arkhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus'. 2010. 191 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

SUBBOTIN Sergey Lvovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Structures and Constructions, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sbtn@yandex.ru

GAVRILENKO Alexey Vladimirovich – Assistant of the Department of Structures and Constructions, Assistant of the Department of Constructions and Structures, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: GavrilenkoAV@tstu.tver.ru

KAZIMIROV Sergei Igorevich – Design Engineer, KB «Kalinin» LLC, 8, Novaya Zarya st., Tver, Russia. E-mail: kazimirow97@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Barkaya T.R., Subbotin S.L., Gavrilenko A.V., Kazimirov S.I. Bending test of a metal-wood panel with flat galvanized sheet walls stiffened by wooden ribs // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 3 (15), pp. 5–11.

УДК 691.539.216

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКИ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО КАРБОНАТНОГО БЕТОНА

В.В. Белов, Т.Р. Баркая, П.В. Куляев

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Белов В.В., Баркая Т.Р.,
Куляев П.В., 2022

Аннотация. Указано, что мелкозернистые карбонатные бетоны – это достаточно востребованный в настоящее время материал, обладающий хорошими показателями по трещиностойкости, морозостойкости, критериям долговечности и надежности строительных материалов и конструкций. Рассмотрена актуальная задача поиска экономически и экологически оправданных способов повышения деформативных свойств

данного бетона. Отражены результаты исследования деформаций мелкозернистых карбонатных бетонов с комплексной добавкой, состоящей из тонкодисперсного известнякового наполнителя и суперпластификатора. Отмечено, что деформации подразделяются на условно-мгновенные, краткосрочные и длительные (ползучесть), в исследовании используется метод планирования экспериментов и специальное оборудование, электротензодатчики для измерения мгновенных деформаций и индикаторы часового типа для измерения деформаций ползучести. Показано, что комплексная добавка способствует снижению деформаций мелкозернистых карбонатных бетонов и ведет к повышению их долговечности за счет модификации структурообразования и интенсификации процесса гидратации.

Ключевые слова: мелкозернистые карбонатные бетоны, деформативные свойства, ползучесть, влияние, химические добавки.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-3-11-22

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей строительного производства является получение мелкозернистых карбонатных бетонов (МЗКБ) с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Эта задача обусловлена необходимостью разработки новых составов МЗКБ на разных уровнях механического воздействия компонентов внутри матрицы [1, 2].

В МЗКБ присутствует матрица, состоящая из цементного раствора, различных добавок и жесткого скелета из заполнителя. Снижение уровня деформаций МЗКБ сводится к реализации процессов выравнивания гидратации за счет более равномерного распределения частиц цемента в объеме МЗКБ; физического вытеснения воды из воздушных и капиллярных микропор, частичного перевода ее в гелевую область [3].

Правильное дозирование, степень дисперсности и технология введения добавок ведут к снижению деформаций МЗКБ, так как делают их более прочными и стойкими к воздействию агрессивных сред [4].

В работах [5–7] представлены современные исследования МЗКБ с минеральными добавками и влияние разнообразных факторов на их физико-механические свойства. Деформации ползучести являются не менее важными эксплуатационными характеристиками МЗКБ [8]. Возникновение этих деформаций обуславливают такие факторы, как водотвердое отношение, размер заполнителя, тонкость помола вяжущего, влажность, возраст бетона к моменту приложения нагрузки, величина нагрузки [9–11].

Воздействие ряда параметров (структуры, состава бетона, процентного содержания пластифицирующих и минеральных добавок) освещено в работах, где также отмечается влияние известнякового тонкодисперсного наполнителя на реологические и технологические свойства бетона [12–14].

Методика оценки долговечности бетонов на композиционном вяжущем рассмотрена в работе [15].

Таким образом, анализ опубликованных работ, как приведенных выше, так и других по данной теме, показывает, что при разработке технологии МЗКБ особое внимание уделяется повышению прочности, морозостойкости, стойкости к циклическим нагрузкам и истиранию (например, при получении дорожных конструкций). Данные задачи не всегда возможно реализовать с помощью существующих методов проектирования композиций

МЗКБ и технологий производства. Особенно это затруднение касается задачи повышения трещиностойкости бетонов, поэтому необходимо совершенствовать научные методы и способы повышения эксплуатационно-технологических свойств МЗКБ (прежде всего их трещиностойкости и долговечности).

Чтобы решить вышеуказанные задачи, требуется реализовать современные идеи по регулированию зернового состава известняков крупной фракции с модификацией состава МЗКБ за счет использования мелкодисперсного наполнителя из известняка дробильно-сортировочного метода обработки и пластифицирующих добавок (совместное применение этих добавок позволяет создать синергетический эффект). Вышеприведенные соображения определяют цели данной работы.

Модели и методы. При исследовании ползучести рассматривается кратковременная ползучесть, продолжительность которой ($t - \tau_0$) мала по сравнению с возрастом бетона τ_0 (100 сут., во время которых была приложена нагрузка). В этом случае можно принять

$$E(\tau) = E(\tau_0) = E = \text{const.}$$

При постоянном напряжении σ

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E} + C\tau_0 \cdot \sigma \cdot (1 - e^{-\gamma(t-\tau)}).$$

Первое слагаемое представляет собой деформацию, развивающуюся в момент приложения нагрузки и не зависящую от времени [7], второе – деформацию ползучести:

$$\varepsilon_{cr} = C\tau_0 \cdot \sigma \cdot (1 - e^{-\gamma(t-\tau)}).$$

Определение деформаций ползучести проводилось на образцах – кубах размером 100×100×100 мм. Данный подход вполне согласуется с предыдущими исследованиями по определению деформационных свойств мелкозернистых бетонов, работающих в сложных условиях нагружения [11]. Загрузка образцов осуществлялась поэтапно. Нагрузка на шаг была равной 50 кН. Мгновенные измерения деформации проводились с помощью тензометрического моста Уинстона. Использовался высокоточный электронный гальванометр с разрешением 10^{-7} . База тензодатчиков составляла 20 мм. Для компенсации контактных (локальных) напряжений при переносе нагрузки на образец использовалась схема свободной (шарнирной) верхней опоры и неподвижной нижней. Задача состояла в оценке развития мгновенных и длительных деформаций мелкозернистого бетона в двух ортогональных плоскостях. Поэтому были использованы два тензометрических датчика (в вертикальной и горизонтальной осях на каждой грани).

Фактическое значение сжимающей нагрузки на образец, кН, устанавливалось динамометром.

Для исследования деформаций ползучести был применен следующий метод. Для испытаний использовались рамки, но измерительными приборами были часовые индикаторы и динамометр (рис. 1).

Деформационные свойства МЗКБ контролировались на трех уровнях: микро-, мезо- и макроуровне. Эти уровни отражают особенности взаимодействия структурообразующих

элементов в мелкозернистом карбонатном бетоне, которые влияют в том числе на деформационное поведение МЗКБ.

Одним из способов уменьшения деформаций ползучести является создание однородной и компактной бетонной конструкции. Данной цели способствуют формирование контактной структуры уплотненного типа с минимальным количеством пустот, а также введение в бетонную конструкцию известнякового микрозаполнителя.

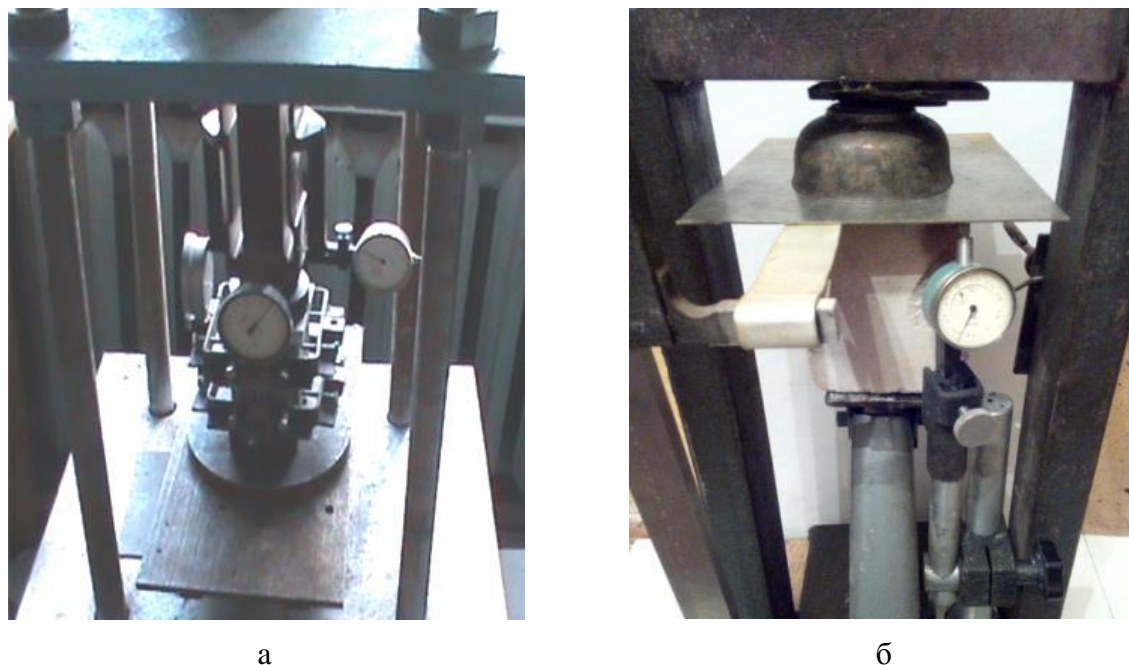


Рис. 1. Тензометрические приборы для оценки деформаций кратковременной ползучести:
а – мгновенной; б – длительной

Заполнитель в работе был оптимизирован по формуле Функа – Дингера в соответствии с данными, представленными в табл. 1. Расходы фракций на 1 м³ смеси приведены в табл. 2.

Таблица 1

Параметры сит, частных и полных остатков согласно распределению Функа – Дингера для известнякового заполнителя

№ фракции	Сита, мм	Остаток			Полный проход, %
		Частный, г	Частный, %	Полный, %	
7	10	0	0	0	100
6	5	227	33,4	33,4	66,6
5	2,5	161	23,7	57,1	42,9
4	1,25	116	17,1	74,2	25,8
3	0,63	80	11,8	86	14
2	0,315	58	8,5	94,5	5,5
1	0,16	38	5,6	100	0

Таблица 2

Расход заполнителя на 1 м³ смеси

№ фракции	Фракция, мм	Расход, кг/м ³
6	5	511
5	2,5	362,4
4	1,25	261,1
3	0,63	180,1
2	0,315	129,1
1	0,16	85,6

При получении микрозаполнителя известняковую крошку измельчали в шаровой мельнице до удельной поверхности около 500 м²/кг и добавляли в смесь в качестве заменителя основного вяжущего в количестве до 50 % мас. (цемент).

Во время анализа влияния ингредиентов компонентов на деформации ползучести МЗКБ был использован метод трехфакторного планового эксперимента типа В-D13 для соответствующей матрицы из десяти вариантов приготовления смеси МЗКБ. Входными переменными были: x_1 – отношение микрозаполнителя из известняка к цементу, %; x_2 – отношение суперпластификатора СП-1 к цементу; x_3 – процентное содержание частиц диаметром 0,08 мм в известняковом микрозаполнителе. В качестве функций отклика были исследованы мгновенные деформации кубических образцов размером 100×100×100 мм. Было испытано пятнадцать образцов (пять из десяти смесей были специально подобраны для испытаний на ползучесть) – кубиков размером 100×100×100 мм (по три образца для каждого из пяти вариантов состава смеси (табл. 3)). Образцы затвердевали в естественных условиях. Пластичность смеси контролировалась распространением стандартного конуса. Для каждого состава было выбрано водотвердое отношение в соответствии с расплывом, равным 110 мм, на встряхивающем столе.

Таблица 3

Расходы компонентов смеси на 1 м³ МЗКБ

№ состава	Вяжущая часть, кг	Заполнитель, кг	Цемент, кг	Известняк, кг	Суперпластификатор СП-1, кг
1	672	1 528	672	0	6,72
2			336	336	0
3			472	200	0
4			472	200	2,11
5			553	119	4,15

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

По методу планирования экспериментов получили регрессионное уравнение для мгновенных деформаций и соответствующие ему диаграммы:

$$Y = 295,9 + 63,51x_1 - 9,3x_2 + 10,12x_3 + 378,5x_1^2 - 158,5x_2^2 - 153,2x_3^2 - 92,9x_1x_2 - 67,49x_1x_3 + 106,85x_2x_3.$$

Графики зависимостей (рис. 2) показали влияние количества известнякового микронаполнителя и суперпластификатора СП-1 в вяжущей части на мгновенные деформации МЗКБ. Минимум деформаций отмечался при содержании известняка в количестве 17–25 % от массы вяжущего, а при превышении 30 % деформации бетона возрастали, достигая предельных значений при содержании суперпластификатора СП-1 в количестве 4–5 % от массы твердой части вяжущего.

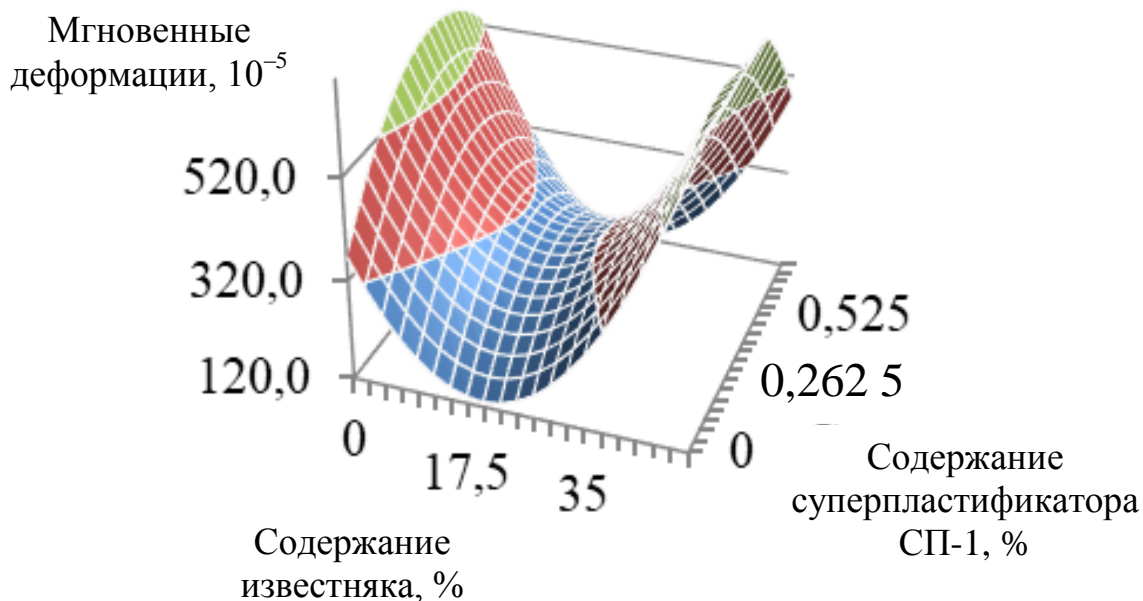


Рис. 2. Зависимость мгновенных деформаций от процентного содержания суперпластификатора СП-1 и наполнителя в процентах в составе модели МЗКБ
 $Y = 3,1x^2 - 6,6x + 46,7$

Составы МЗКБ, для которых проведены эксперименты на кратковременную ползучесть, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Составы бетонов

№ состава	Состав бетона
1	В/Ц = 0,34; И/Ц = 0 %; СП-1 = 1 %
2	В/Ц = 0,45; И/Ц = 50 %; СП-1 = 0 %
3	В/Ц = 0,39; И/Ц = 17,8 %; СП-1 = 0,75 %
4	В/Ц = 0,41; И/Ц = 50 %; СП-1 = 0,75 %
5	В/Ц = 0,46; И/Ц = 30 %; СП-1 = 0,75 %

Номера составов и соответствующие расчетные значения мер линейной ползучести бетона даны в табл. 5.

Таблица 5

Расчетные значения мер линейной ползучести бетона в зависимости от состава

№ состава	В/Ц	И/Ц	СП, %	$C_{cr}(28)_{расч}$
1	0,45	50	0	$7,5E^{-05}$
2	0,34	0	1	$4E^{-05}$
3	0,46	30	0,75	$7,7E^{-05}$
4	0,39	17,8	0,75	$4,2E^{-05}$
5	0,41	50	0,75	$6E^{-05}$

Номера составов и экспериментальные значения меры линейной ползучести C_{τ_0} и σ приведены в табл. 6.

Таблица 6

Экспериментальные значения меры линейной ползучести C_{τ_0}
в зависимости от состава бетона

№ состава	$C_{\tau_0} \cdot \sigma$	$C_{\tau_0}, \text{МПа}^{-1}$
1	$18,8 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
2	$80 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
3	$39 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
4	$11 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
5	$37 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$

Номера составов, соответствующие им расчетные зависимости, теоретические $C_{cr, теор}$ и экспериментальные $C_{cr, эксп}$ значения меры линейной ползучести бетона даны в табл. 7.

Таблица 7

Приближенные расчетные зависимости,
теоретические $C_{cr, теор}$ и экспериментальные $C_{cr, эксп}$ значения меры
линейной ползучести бетона в зависимости от состава бетона

№ состава	$C_{cr, эксп}$	$C_{cr, теор}$
1	$2,8 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$
2	$4 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$
3	$3 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$
4	$1 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$
5	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$7,7 \cdot 10^{-5}$

Полученные математические модели позволяют оптимизировать расход микронаполнителя и суперпластификатора по технологическим и эксплуатационным свойствам и проектировать бетоны с пониженным уровнем мгновенных, кратковременных и длительных деформаций. Минимум мгновенных деформаций регистрируется при

содержании микронаполнителя в бетоне около 18–22 % (см. рис. 2), при котором между заполнителем и вяжущим образуется более плотная и однородная композитная структура с вязким гелевым компонентом и жестким каркасом заполнителя, обеспечивающая улучшенные эксплуатационные характеристики бетона, с повышенной трещиностойкостью и уменьшенными значениями деформаций. Совместное применение мелкодисперсного наполнителя и суперпластификатора выявляет синергетический эффект, обусловленный улучшением адсорбции частиц комплексной добавки на частицах цемента и повышением адгезии зерен заполнителя, цемента и добавки при твердении бетона. Данные вышеприведенных экспериментов свидетельствуют о том, что мелкодисперсный известняковый наполнитель связывает свободную влагу при твердении бетона, что, в свою очередь, способствует минимизации деформаций МЗКБ.

ВЫВОДЫ

Теоретические и экспериментальные значения меры линейной ползучести существенно различаются для составов МЗКБ с добавлением известняка и суперпластификатора, испытанных в возрасте 100 сут. Наличие мелкой фракции известняка уменьшает деформации ползучести. Этот эффект более выражен в композициях с мелкодисперсным известняковым компонентом в вяжущем до 30 % и суперпластифицирующей добавкой СП-1 в количестве 0,75 % от вяжущего. При затвердевании бетона заполнитель вместе с суперпластификатором СП-1 способствует укреплению зоны контакта цементного камня с заполнителем. В этом случае между наполнителем и связующим образуется более прочная композитная структура, что снижает уровень длительных деформаций ползучести в среднем на 80 %, а это способствует увеличению эффективности и физико-механических свойств МЗКБ, его ранней прочности (последнее в среднем на 30 %). В дальнейшем предполагается провести исследования по изучению поведения МЗКБ на различных уровнях упрочнения структуры, нагружения и деформаций ползучести, а также с разными видами пластификаторов в составе комплексной добавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В.В., Смирнов М.А. Новые принципы определения состава высококачественного бетона // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2008. Вып. 13. С. 341–346.
2. Низина Т.А., Пономарев А.Н., Балыков А.С. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок // *Строительные материалы*. 2016. № 9. С. 68–72.
3. Бердов Г.И., Ильина Л.В., Зырянова В.Н., Никоненко Н.И., Мельников А.В. Повышение свойств композиционных строительных материалов введением минеральных микронаполнителей // *Стройпрофиль: строительные технологии и бетоны*. 2012. № 2. С. 26–30.
4. Плагин А.А., Костюк Т.А., Салия М.Г., Бондаренко Д.А. Применение карбонатных добавок в цементных составах для гидроизоляционных и реставрационных работ зданий и сооружений // *Сборник научных трудов Института строительства и архитектуры МГСУ (посв. 90-летию ф-та ПГС)*. М.: МГСУ. 2011. С. 224–227.
5. Schutter G.De. Effect of limestone filler as mineral addition in self-compacting concrete // *36th Conference on Our World in Concrete & Structures: Recent Advances in the Technology*

of Fresh Concrete', Proceedings. Ghent: Ghent University, Department of Structural engineering. 2011, pp. 49–54.

6. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Определяющие соотношения показателей сопротивления разрушению цементных бетонов и параметров их структуры // *Строительство и реконструкция*. 2015. № 5. С. 167–174.

7. Максимова И.Н., Ерофеев В.Т., Макридин Н.И., Полубарова Ю.В. Комплексная оценка параметров качества структуры и механики разрушения цементного камня // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2015. № 3 (675). С. 14–22.

8. Белов В.В., Субботин С.Л., Куляев П.В. Прочностные и деформативные свойства бетонов с карбонатными микрозаполнителями // *Строительные материалы*. 2015. № 3. С. 25–29.

9. Балыков А.С., Низина Т.А., Макарова Л.В. Разработка составов высокопрочных мелкозернистых бетонов на природном и техногенном заполнителях и критериев оценки их эффективности // *Высокопрочные цементные бетоны: технологии, конструкции, экономика (ВПБ-2016)*. Казань: КГАСУ. 2016. С. 19.

10. Chaid R., Jauberthie R., Boukhaled A. Effet de l'ajout calcaire sur la durabilite des betons // *Lebanese Science Journal*. 2010. Vol. 11. No. 1, pp. 91–103.

11. Desnerck P., Schutter G. De., Taerwe L. Stress-strain behavior of self-compacting concretes containing limestone fillers // *Structural concrete*. 2012. No. 2. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Stress-strain-behaviour-of-self-compacting-fillers-Desnerck-Schutter/94fdc94975a49e681593495992d636aa2395f276> (дата обращения: 21.05.2022).

12. Хозин В.Г., Сибгатуллин И.Р., Хохряков О.В., Красникова Н.М. Производство ЦНВ из техногенных отходов – эффективный путь решения экологических и сырьевых проблем // *Строительные материалы*. 2012. № 6. С. 190–192.

13. Лесовик В.С., Чулкова И.Л. Управление структурообразованием строительных композитов. Омск: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия. 2011. 462 с.

14. Лесовик В.С., Агеева М.С., Денисова Ю.В., Иванов А.В. Использование композиционных вяжущих для повышения долговечности бетонной брусчатки // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011. № 4. С. 52–54.

15. Ерофеев В.Т., Ерофеев П.С., Меркулов А.И., Митина Е.А., Максимова И.Н., Меркулов Д.А. Методика прогноза механических параметров бетонов методом численного моделирования // *Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред: Материалы XXI Международного симпозиума имени А.Г. Горшкова*. М.: МАИ. 2015. С. 29–31.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

КУЛЯЕВ Павел Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В., Баркая Т.Р., Куляев П.В. Влияние комплексной добавки на ползучесть мелкозернистого карбонатного бетона // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 3 (15). С. 11–22.

EFFECT OF COMPLEX ADDITIVE ON CREEP OF FINE-GRAINED CARBONATE CONCRETE

V.V. Belov, T.R. Barkaya, P.V. Kulyaev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Fine-grained carbonate concretes are a fairly popular material at present, with good indicators for crack resistance, frost resistance, criteria for durability and reliability of building materials and structures. The task of finding the most economically and ecologically justified ways to increase the deformation properties of this concrete is relevant. The article reflects the results of the investigation of deformations of fine-grained carbonate concrete with a complex additive consisting of finely dispersed limestone filler and superplasticizer. Deformations are divided into conditionally instantaneous, short-term and long-term (creep). The study uses a method of planning experiments and special equipment, electric strain gauges for measuring instantaneous deformations and hour-type indicators for measuring creep deformations. It is shown that complex additive contributes to reduction of deformations of fine-grained carbonate concrete and leads to increase of their durability due to modification of structure formation and intensification of hydration process.

Keywords: fine-grained carbonate concretes, deformation properties, creep, influence, chemical additives.

REFERENCES

1. Belov V.V., Smirnov M.A. New principles for determining the composition of high-quality concrete. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2008. Iss. 13, pp. 341–346. (In Russian).
2. Nizina T.A., Ponomarev A.N., Balykov A.S. Fine disperse-reinforced concretes on the basis of complex modifying additives. *Stroitel'nye materialy*. 2016. No. 9, pp. 68–72. (In Russian).
3. Berdov G.I., Il'ina L.V., Zyryanova V.N., Nikonenko N.I., Mel'nikov A.V. Improving the properties of composite building materials by introducing mineral micro-fillers. *Strojprofil': stroitel'nye tekhnologii i betony*. 2012. No. 2, pp. 26–30. (In Russian).
4. Plugin A.A., Kostyuk T.A., Saliya M.G., Bondarenko D.A. Application of carbonate additives in cement compositions for waterproofing and restoration works of buildings and structures. *Collection of scientific papers of the Institute of Construction and Architecture of MGSU (ded. 90th Anniversary of the Faculty of PGS)*. Moscow: MGSU. 2012, pp. 224–227. (In Russian).

5. Schutter G.De. Effect of limestone filler as mineral addition in self-compacting concrete. *36th Conference on Our World in Concrete & Structures: Recent Advances in the Technology of Fresh Concrete', Proceedings*. Ghent: Ghent University, Department of Structural engineering. 2011, pp. 49–54.
6. Chernyshov E.M., Korotkih D.N. Essential relations between failure resistance parameters and structure parameters for mortar concrete. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2015. No. 5, pp. 167–174. (In Russian).
7. Maksimova I.N., Erofeev V.T., Makridin N.I., Polubarova Y.V. Comprehensive assessment of the quality parameters of the structure and mechanics of the destruction of cement stone. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo*. 2015. No. 2, pp. 14–22. (In Russian).
8. Belov V.V., Subbotin S.L., Kulyaev P.V. Comprehensive assessment of the quality parameters of the structure and mechanics of the destruction of cement stone. *Stroitel'nye materialy*. 2015. No. 3, pp. 25–28. (In Russian).
9. Balykov A.S., Nizina T.A., Makarova L.V. Development of compositions of high-strength fine-grained concrete on natural and man-made aggregates and criteria for evaluating their effectiveness. *High-strength cement concretes: technologies, constructions, economics (VPB-2016)*. Kazan: KGASU. 2016, p. 19. (In Russian).
10. Chaid R., Jauberthie R., Boukhaled A. Effet de l'ajout calcaire sur la durabilite des betons. *Lebanese Science Journal*. 2010. Vol. 11. No. 1, pp. 91–103.
11. Desnerck P., Schutter G.De., Taerwe L. Stress-strain behavior of self-compacting concretes containing limestone fillers. *Structural concrete*. 2012. No. 2. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Stress-strain-behaviour-of-self-compacting-fillers-Desnerck-Schutter/94fdc94975a49e681593495992d636aa2395f276> (accessed: 21.05.2022).
12. Hozin V.G., Sibgatullin I.R., Hohryakov O.V., Krasnikova N.M. Production of CNV from man-made waste is an effective way to solve environmental and raw materials problems. *Stroitel'nye materialy*. 2012. No. 6, pp. 190–192. (In Russian).
13. Lesovik V.S., Chulkova I.L. Upravlenie strukturoobrazovaniem stroitel'nyh kompozitov [Management of structure formation of building composites]. Omsk: Siberian State Automobile and Road Academy. 2011. 462 p.
14. Lesovik V.S., Ageeva M.S., Denisova Yu.V., Ivanov A.V. The use of composite binders to increase the durability of concrete pavers. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova*. 2011. No. 4, pp. 52–54. (In Russian).
15. Erofeev V.T., Erofeev P.S., Merkulov A.I., Mitina E.A., Maksimova I.N., Merkulov D.A. The method of forecasting the mechanical parameters of concrete by numerical modeling. *Dynamic and technological problems of mechanics of structures and continuous media: Materials of the XXI International Symposium named after A.G. Gorshkov*. Moscow: MAI. 2015, pp. 29–31. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

KULYAEV Pavel Victorovitch – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V., Barkaya T.R., Kulyaev P.V. Effect of complex additive on creep of fine-grained carbonate concrete // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 3 (15), pp. 11–22.

УДК 691.32

СПОСОБ БЫСТРОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕСОВОЙ ВЛАЖНОСТИ ПЕСКА ДЛЯ КОРРЕКТИРОВАНИЯ СОСТАВА БЕТОНА

Ю.Г. Косивцов, В.И. Гультияев

Тверской государственной технической университет (г. Тверь)

© Косивцов Ю.Г., Гультияев В.И., 2022

Аннотация. Рассмотрен экспресс-метод определения весовой влажности песка для изготовления бетонной смеси, позволяющий за 5–7 мин без применения сложной вычислительной техники и оборудования рассчитать необходимое количество воды затворения.

Ключевые слова: бетонная смесь, весовая влажность, песок, энергоресурсосбережение.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-3-22-25

В бетонных смесях содержится почти вдвое меньше воды по массе, чем цемента, поэтому ошибка в дозировании воды существенно сказывается на отклонении фактического водоцементного отношения (В/Ц) от рассчитанного. Увеличение расхода воды ведет к снижению прочности бетона, уменьшение – к ухудшению удобоукладываемости бетонной смеси. Чтобы избежать грубой ошибки в дозировании расхода воды, необходимо учесть в первую очередь наличие влаги в песке. Весовая влажность песка варьируется в интервале 1–9 %. Песок является материалом открытого штабельного хранения, часто увлажняется, характеризуется неоднородностью влажности. Следовательно, систематическое определение его весовой влажности крайне необходимо. Обычно ее находят с помощью подсчета по данным взвешивания пробы песка до и после высушивания в сушильном шкафу при температуре 110 ± 5 °С [2; 3]. Но такой подсчет занимает много времени, поэтому описанным способом чаще устанавливают весовую влажность единичной пробы песка, что не всегда дает представление о реальной влажности всего массива песка в штабеле. Кроме того, при высушивании удаляется и влага, поглощенная порами материала песка, которая не влияет на истинное В/Ц бетонной

смеси: эта влага завывает подлежащую учету весовую влажность песка при его дозировании на замес бетонной смеси.

Весовую влажность обычного (преимущественно кварцевого речного или горного) песка можно определить очень простым способом за несколько минут, если использовать для этого технические (торговые) весы и стандартный лабораторный металлический сосуд вместимостью 1 л, который следует подобрать таким образом, чтобы в него помещалось ровно 1 000 г воды, залитой под обрез его кромок. В этот сосуд можно поместить навеску взятого из штабеля песка в его естественно влажном состоянии массой $M = 1$ кг, залить водой, тщательно перемешать, налить воду под обрез кромок, взвесить, после чего весовую влажность $W_{п}$ подсчитать по формуле

$$W_{п} = ((G_{п} - 1) / G_{п}(P_{нач} - 1) - 1) \cdot 100 \%,$$

где $P_{нач} = M + M_4$ (масса навески M плюс масса долитой воды под обрез кромок сосуда по результатам взвешивания M_4), кг; $G_{п}$ – плотность слагающей породы песка, кг/л.

На основании приведенной выше формулы можно предложить еще более простую методику определения весовой влажности песка (за 5–7 мин без всяких вычислений), которая сводится к следующим операциям с использованием выверенных весов и литрового сосуда. Стандартный металлический сосуд вместимостью 1 л устанавливают на технические весы и уравнивают грузом. Затем в сосуд помещают 1 000 г песка в исследуемом состоянии. Сосуд снимают с весов, вливают в него воду, не доводя ее уровень до верха на 20–30 мм. Песок с водой тщательно перемешивают ложкой в течение нескольких минут для удаления пузырьков заземленного воздуха. Затем сосуд вновь устанавливают на весы и доливают в него воду доверху, под обрез кромок. После получения результатов взвешивания находят в таблице величину весовой влажности песка при известной плотности слагающей его породы. Плотность самой слагающей породы для данной партии песка следует определить заблаговременно этим же методом, но для этого нужно использовать высушенный песок. Ближайший результат взвешивания песка с весовой влажностью «0» (см. цифры 1 615, 1 618, 1 621) укажет в крайней левой графе на усредненную плотность породы песка.

Данные для определения весовой влажности песка выглядят следующим образом:

Плотность породы песка, кг/л	Результат взвешивания песка с водой, г									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2,60	1 615	1 609	1 603	1 597	1 592	1 586	1 581	1 575	1 570	1 565
2,62	1 618	1 612	1 606	1 600	1 595	1 589	1 583	1 578	1 573	1 567
2,64	1 621	1 615	1 609	1 603	1 597	1 592	1 586	1 581	1 575	1 570
Весовая влажность, %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Рассмотрим приемлемость описанного способа для применения на практике. Точность взвешивания воды при дозировке компонентов бетонных смесей, согласно ГОСТ 7473-2010, регламентируется допуском ± 2 %, что при расходе воды порядка

180–220 кг на 1 м³ бетонной смеси составит 3,6–4,4 кг. При определении весовой влажности песка используются технические весы с ценой деления 5 г, а точность взвешивания оценивается в половину цены деления, то есть в 2,5 г.

В приведенных выше данных можно видеть, что между соседними цифрами в строке разница составляет 4–6 г, а в ряду – 3 г. Следовательно, точность взвешивания позволяет определять весовую влажность по интерполяции с кратностью шага 0,3–0,5 %. При ориентировочном расходе песка на 1 м³ бетонной смеси в пределах 600–700 кг отклонение от фактического водосодержания на 0,3 % составит 1,8–2,1 кг, что не превышает допуски стандарта. Эксперименты подтвердили хорошую воспроизводимость результатов, полученных с помощью описанного метода определения весовой влажности песка, и их сходство с результатами, выведенными при применении методики высушивания песка. Более подробная информация по рассмотренной методике содержится в работе [1]. Этим способом можно быстро найти весовую влажность песка нескольких проб, взятых из разных мест штабеля, что повысит надежность результатов.

Описанная методика оперативного определения весовой влажности песка с целью корректирования водосодержания бетонных смесей во время их приготовления очень проста. Мы предлагаем использовать ее на практике, в том числе для обучения студентов строительных специальностей. Особое внимание рекомендуем обратить на источник информации [4]. Его можно бесплатно скачать из интернета для ознакомления (содержит методику решения на персональном компьютере 27 типов задач по энергоресурсосбережению в строительстве), для этого следует набрать «Энергоресурсосбережение в строительстве. Косивцов Ю.Г.».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косивцов Ю.Г. Ускоренный способ определения весовой влажности песка для бетона // *Строительство и архитектура: Сборник научных трудов инженерно-строительного факультета. Вып. 2.* Тверь: ТГТУ. 2000. С. 93–95.
2. Ключковский Г.И., Мануйлов Л.А. Лабораторный практикум по общей технологии силикатов: учебное пособие для техникумов. М.: Стройиздат. 1975. 271 с.
3. Лещинский М.Ю. Испытание бетона: справочное пособие. М.: Стройиздат. 1980. 360 с.
4. Косивцов Ю.Г. Энергоресурсосбережение в строительстве. Компьютерная система ТСП для строителей: учебное пособие. Тверь: Мир полиграфии. 2019. 310 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КОСИВЦОВ Юрий Георгиевич – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

ГУЛЬТЯЕВ Вадим Иванович – доктор технических наук, заведующий кафедрой автомобильных дорог, оснований и фундаментов, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vig0@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Косивцов Ю.Г., Гульяев В.И. Способ быстрого определения весовой влажности песка для корректирования состава бетона // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 3 (15). С. 22–25.

A METHOD FOR QUICKLY DETERMINING THE WEIGHT HUMIDITY SAND FOR CORRECTING THE COMPOSITION OF CONCRETE

Yu.G. Kosivtsov, V.I. Gulyaev
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article describes an express method for determining the weight moisture content of sand for the manufacture of concrete mix, which allows for 5–7 min without the use of complex computer technology and equipment to calculate the required amount of mixing water.

Keywords: concrete mix, weight humidity of sand, energy saving.

REFERENCES

1. Kosivtsov Yu.G. An accelerated method for determining the weight moisture content of sand for concrete. *Construction and architecture: Collection of scientific works of the Faculty of Civil Engineering. Iss. 2*. Tver: TGTU. 2000, pp. 93–95. (In Russian).
2. Klyukovsky G.I., Manuilov L.A. *Laboratornyy praktikum po obshchey tekhnologii silikatov: uchebnoye posobiye dlya tekhnikumov* [Laboratory workshop on the general technology of silicates: a textbook for technical schools]. Moscow: Stroyizdat. 1975. 271 p.
3. Leshchinsky M.Yu. *Ispytaniye betona: spravochnoye posobiye* [Concrete testing: a reference guide]. Moscow: Stroyizdat. 1980. 360 p.
4. Kosivtsov Yu.G. *Energoresursosberezhenie v stroitel'stve. Komp'yuternaya sistema TSP dlya stroitelej* [Energy conservation in construction. TSP computer system for builders]. Tver: Mir poligrafii. 2019. 310 p.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

KOSIVTSOV Yuri Georgievich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

GULTYAEV Vadim Ivanovich – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Roads, Substructures and Foundations, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vig0@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kosivtsov Yu.G., Gulyaev V.I. A method for quickly determining the weight humidity sand for correcting the composition of concrete // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 3 (15), pp. 22–25.

УДК 624.016

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЧАСТОРЕБРИСТЫХ
СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ
В СОВРЕМЕННОМ ДОМОСТРОЕНИИ***А.В. Левиков**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Левиков А.В., 2022

Аннотация. Рассмотрены основные достоинства и недостатки технологии применения сборно-монолитных перекрытий в современном домостроении. Проведено сравнение этой технологии со сборными пустотными плитами перекрытия и сплошными монолитными плитами. Особое внимание уделено основной проблеме указанного типа перекрытий – крайне низкой распределительной способности нагрузок поперек пролета. Проанализирован результат расчета распределительной способности нагрузки различных схем расположения ребер, армопоясов, раскрепляющей балки на сосредоточенную нагрузку. Даны рекомендации по целесообразному применению часторебристых сборно-монолитных перекрытий в домостроении.

Ключевые слова: часторебристые сборно-монолитные перекрытия, пустотелые блоки, ребро жесткости.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-3-26-32

Первое упоминание о сборно-монолитных ребристых перекрытиях датируется 1931 годом: оно встречается в книге «Железобетон. Его расчет и проектирование» профессора Венского политехнического института Р. Залигера. Он предложил в качестве пустотообразователя применять тростниковые коробки и деревянные планки. Затем академик К.В. Сахновский в учебнике 1939 года «Железобетонные конструкции» рекомендовал использовать в перекрытиях бетонные пустотелые камни (блоки), которые были прообразом современных монолитных ребристых конструкций. Спустя порядка 40 лет описанная технология нашла широкое применение в странах Европы. С 2008 года ее внедряют на территории России, причем используют все разновидности (от полностью монолитного часторебристого перекрытия с пустотообразователями в виде ячеистых блоков до сборно-монолитных перекрытий заводского комплекта поставки, в которых в качестве опалубки выступают и пустотообразователи специальных заводских балок, и пустотелые бетонные блоки (рис. 1)).

Современное часторебристое сборно-монолитное перекрытие представляет собой несъемную опалубку монолитного бетонного ребристого перекрытия, содержащую балки, уложенные на опорные поверхности, с основанием, выполненным на базе бетонного бруска заводского изготовления (или без бруска). На основании зафиксирован арматурный каркас. Опалубка также содержит пустотные бетонные блоки заводского изготовления или пустотообразователи в виде ячеистого бетона, керамического блока и другие, после установления которых образуется сплошная поверхность между соседними балками, выполненными в виде полок. Эти полки крепятся с внешней стороны основания (рис. 2).

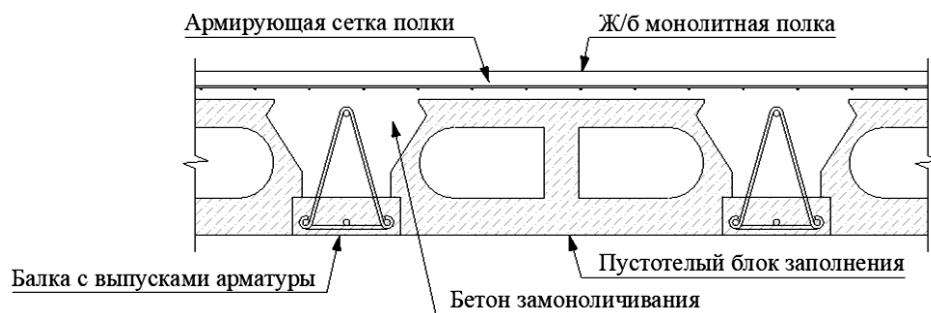


Рис. 1. Поперечное сечение монолитного часторёбристого перекрытия, сделанного с использованием заводских элементов



Рис. 2. Общий вид процесса монтажа часторёбристого сборно-монолитного перекрытия без заводских элементов

За 14 лет эксплуатации технология отечественного производства сборно-монолитного перекрытия претерпела ряд изменений, благодаря которым удалось адаптировать конструкции к номенклатуре местного строительного рынка, снизить вес конструкций, уменьшить стоимость готового перекрытия. Например, в 2012 году в балке заводского изготовления несъемная железобетонная нижняя опалубка (бетонный брусок) была заменена на П-образный тонкостенный профиль, имеющий полки, выполненные на стенках профиля с внешней стороны с возможностью установки на них элементов опалубки [2]. В 2013 году пустообразователи были заменены на тонкостенные вкладыши с поперечным сечением арочной формы [3].

К основным достоинствам сборно-монолитного часторебристого перекрытия, которых нет у сборных пустотных плит, относят:

малый вес (на 15–25 % легче, чем железобетонные изделия марки ПК);

возможность создавать консольные вылеты;

отсутствие потребности в применении мощных подъемно-транспортных машин и механизмов [1].

Целевыми объектами применения часторебристых монолитных перекрытий являются здания жилых домов, административных и общественных зданий, школ, больниц, то есть здания, в которых отсутствуют значимые сосредоточенные нагрузки от оборудования и подвижных грузов. Подобные ограничения связаны с основной нерешенной проблемой часторебристого монолитного перекрытия: оно обладает крайне низкой распределительной способностью нагрузок поперек пролета (только за счет полки), в отличие от сборных железобетонных пустотных плит перекрытия или от сплошных монолитных плит, в которых рабочая арматура располагается в продольном и поперечном направлениях.

Актуальность проблемы применения часторебристых перекрытий обусловлена необходимостью разместить на перекрытии оборудование (станки, производственную машину), особые предметы интерьера (бильярдный стол, аквариум), опереть лестницу и др. Для решения этой проблемы требуется знать долю нагрузки, которая прилагается к целевому нагруженному ребру. Нужно также знать, какая часть нагрузки перераспределится на соседние элементы.

С целью выявления степени перераспределения нагрузки за счет полки был выполнен расчет в программном комплексе SCAD нескольких вариантов конструктивных схем. Ребра монолитного перекрытия приняты сечением 250 мм в высоту и 150 мм в ширину, высота полки – 50 мм. Расчет линейный. Схемы замоделированы пластинчатыми элементами. Приложена точечная нагрузка величиной 2 т в центре перекрытия. Точной жесткостью элементов пренебрегли: она подобрана таким образом, чтобы наглядно показать характер прогибов и характер распределения нагрузки. В связи с вышеизложенным расчет носит ознакомительный характер и в реальных условиях проектирования требует уточнения всех исходных данных и условий работы. Расчетная схема показана на рис. 3, схема сечения фрагмента часторебристого перекрытия – на рис. 4. Результаты расчета представлены в таблице.

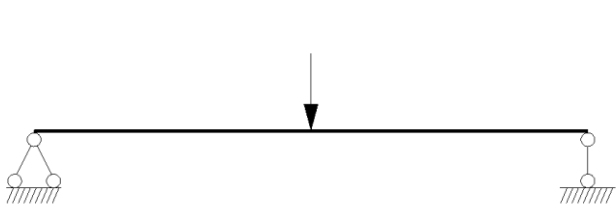


Рис. 3. Расчетная схема

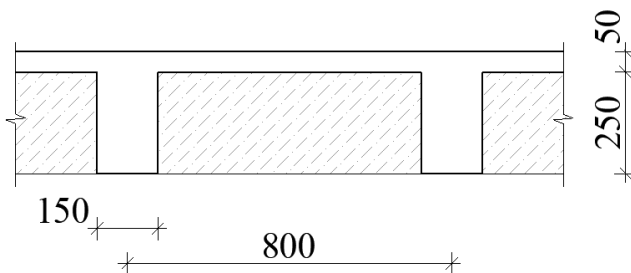
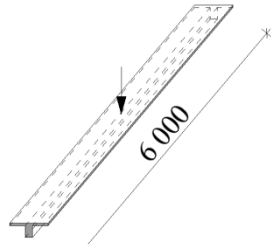
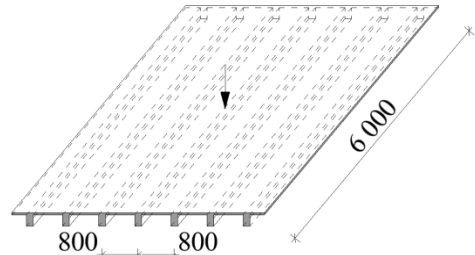
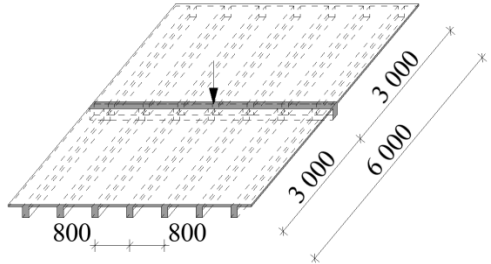
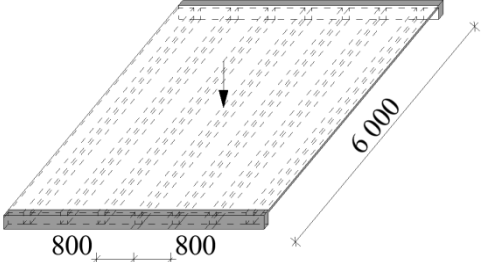
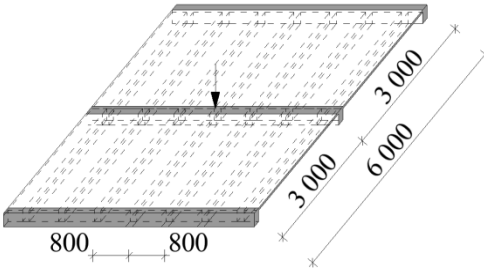


Рис. 4. Схема поперечного сечения фрагмента часторебристого перекрытия

Результаты расчета прогибов целевого нагруженного ребра и соседних ребер при заданных схемах

Фрагмент часторебристого перекрытия с нагружением на центральную балку	Графическая схема фрагмента часторебристого перекрытия	Прогиб центральной балки, мм	Прогиб соседних балок на удалении, мм, от центральной балки	
			800	1 600
1	2	3	4	5
Изолированная тавровая балка		48	—	—
Балочное перекрытие с неразрезной полкой		25	9	1
Балочное перекрытие с неразрезной полкой и центральным ребром жесткости		9	8	5

Окончание таблицы

1	2	3	4	5
Балочное перекрытие с неразрезной полкой и армопоясом над опорами		16	7	3
Балочное перекрытие с неразрезной полкой, с центральным ребром жесткости и армопоясом над опорами		5	4	3

Проанализируем результаты расчета. В первой схеме была найдена изолированная тавровая балка с прогибом около 48 мм. Все последующие результаты будем сравнивать с этим значением прогиба.

Во второй расчетной схеме ребра расположены равномерно с шагом 800 мм. Результат прогиба получился на 50 % меньше, чем в изолированной тавровой балке за счет перераспределения нагрузки на соседние ребра. Причем только 25 % нагрузки перераспределилось на соседнее ребро с удалением на 800 мм и около 2 % на ребро с удалением на 1 600 мм. Это наглядно показывает низкую степень перераспределения нагрузки через полку перекрытия.

В четвертую расчетную схему были добавлены армопояса, опертые на стену. Данное решение значительно улучшило условия работы расчетной схемы, так как снизился прогиб центральной балки на 36 % по сравнению со вторым вариантом и улучшилось перераспределение нагрузки на соседние ребра с удалением на 1 600 мм до 11 %. В итоге доля перераспределенной нагрузки с центрального ребра составляет около 46 %. Именно такая схема является классической в современном домостроении. Подобный результат крайне ограничивает применение часторебристых перекрытий при значительных сосредоточенных и динамических нагрузках.

В третьей и пятой расчетных схемах было добавлено дополнительное перпендикулярное центральной балке ребро жесткости, которое значительно улучшает показатели прогиба и характер перераспределения приложенной нагрузки. На практике подобное решение с дополнительными ребрами жесткости увеличивает вес перекрытия, повышает сложность вязки рабочей арматуры и закладных деталей и, как следствие, нивелирует преимущества часторебристого перекрытия перед сборными железобетонными плитами заводского производства.

Помимо крайне низкого распределения нагрузок поперек пролета, часторебристые перекрытия описанной технологии позволяют перекрывать пролеты до 9 м, причем на 9-метровом пролете общая высота несущей части перекрытия с полкой достигает порядка 400 мм и используется рабочая арматура диаметром 22–25 мм [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам расчета распределительной способности нагрузок часторебристого перекрытия, выявления ограничений по длине перекрываемого пролета и сравнения указанных перекрытий со сборными пустотными плитами перекрытия и сплошными монолитными плитами можно констатировать, что применение часторебристых сборно-монолитных перекрытий в возводимых зданиях нецелесообразно. Основные достоинства подобных перекрытий, а именно возможность создавать консольные вылеты и отсутствие потребности в использовании мощных подъемно-транспортных машин и механизмов, могут быть в равной мере применены при реконструкции существующей застройки, где использование часторебристых сборно-монолитных перекрытий позволит с минимальными временными и экономическими затратами на разборку и сборку сохранившихся конструкций произвести замену перекрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербач А.В., Сас С.А. Часторебристые сборно-монолитные перекрытия. Особенности расчета и проектирования // *Проблемы современного бетона и железобетона: Сборник научных трудов* / редкол.: О.Н. Лешкевич [и др.]. Минск: Ин-т БелНИИС. 2015. Вып. 7. С. 229–243.
2. Патент РФ 123042. *Элемент монолитного бетонного перекрытия* / Мартынюк В.В. Заявл. 22.02.2013. Оpubл. 10.08.2013. Бюл. № 22.
3. Патент РФ 138832. *Несъемная опалубка монолитного бетонного ребристого перекрытия* / Мартынюк В.В., Мартынюк М.В. Заявл. 26.08.2013. Оpubл. 27.03.2014. Бюл. № 9.
4. СТО-33051099.001-2015. *Типовые решения в конструкциях каркасно-балочных сборно-монолитных перекрытий МАРКО с блоками из газобетона*. Держинск. 2016. 61 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ЛЕВИКОВ Александр Валерьевич – кандидат философских наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: leviksa@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Левиков А.В. Особенности применения часторебристых сборно-монолитных перекрытий в современном домостроении // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 26–32.

FEATURES OF APPLICATION OF FREQUENTLY RIBBED PREFABRICATED-MONOLITHIC FLOORS IN MODERN HOUSE-BUILDING

A.V. Levikov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article discusses the main advantages and disadvantages of the technology of using precast-monolithic floors in modern housing construction in comparison with prefabricated hollow-core floor slabs and solid monolithic slabs. Particular attention is paid to the main problem of this type of floors – the extremely low distribution capacity of loads across the span. The result of the calculation of the distribution capacity of the load of various arrangements of ribs, armored belts, unfastening beams for a concentrated load is presented and analyzed. Recommendations are given on the expedient field of application of often-ribbed prefabricated monolithic ceilings in housing construction.

Keywords: often ribbed prefabricated monolithic ceilings, hollow blocks, stiffener.

REFERENCES

1. Shcherbach A., Sas S. Composite multi-ribbed slabs. Design peculiarities. *Problems of modern concrete and reinforced concrete: Collection of scientific papers* / editorial board: O.N. Leshkevich [et al.]. Minsk: Inst. BelNIIS. 2015. Iss. 7, pp. 229–243. (In Belarus).
2. Patent RF 123042. *Element monolitnogo betonogo perekrytiya* [Monolithic concrete floor element]. Martynyuk V.V. Declared 22.02.2013. Published 10.08.2013. Bulletin No. 22. (In Russian).
3. Patent RF 138832. *Nes'yemnaya opalubka monolitnogo betonogo rebristogo perekrytiya* [Fixed formwork of a monolithic concrete ribbed slab]. Martynyuk V.V., Martynyuk M.V. Declared 26.08.2013. Published 27.03.2014. Bulletin No. 9. (In Russian).
4. STO-33051099.001-2015. *Tipovyye resheniya v konstruktsiyakh karkasno-balochnykh sborno-monolitnykh perekrytiy MARKO s blokami iz gazobetona* [Standard solutions in the construction of frame-beam prefabricated monolithic floors MARKO with blocks of aerated concrete]. Dzhherzhinsk. 2016. 61 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

LEVIKOV Alexander Valeryevich – Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: leviksa@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Levikov A.V. Features of application of frequently ribbed prefabricated-monolithic floors in modern house-building // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 3 (15), pp. 26–32.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 674.093

**ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА КОМПЬЮТЕРНОЙ АЛГЕБРЫ
ПРИ РЕШЕНИИ УЧЕБНЫХ ЗАДАЧ ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ***Ф.В. Качановский**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Качановский Ф.В., 2022

Аннотация. Рассмотрен характерный пример применения пакета компьютерной алгебры при решении типовых задач по термодинамике в сравнении с традиционным способом их решения. Показано, что пакет компьютерной алгебры имеет существенные преимущества перед бескомпьютерной технологией решения задач, в частности он избавляет студента от необходимости выполнять громоздкие утомительные вычисления, направляет его интеллектуальные ресурсы на усвоение смысла задачи, поиск правильного метода ее решения и тем самым повышает познавательную ценность учебной работы.

Ключевые слова: пакет, компьютерная алгебра, учебная термодинамическая задача, уравнение Клапейрона, формула, функция, программа, график.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-3-33-39

Информационные технологии в технических вузах применяются в учебном процессе давно. Наиболее распространено использование компьютера как текстового редактора и принтера, а также как универсального интернет-справочника. При решении типовых инженерных задач чаще всего используют калькуляторы и расчетные (интерполяционные) таблицы, поскольку методы решения таких задач созданы в эпоху ручного счета и не содержат специальных операторов и функций, реализующих эффективные вычислительные алгоритмы. Однообразные и утомительные вычисления, которые студент вынужден выполнять при решении таких задач, «затемняют» их содержательную и познавательную ценность и порождают многочисленные ошибки.

В то же время существуют и развиваются прикладные математические программы для компьютеров, которые позволяют выполнять сложные и громоздкие инженерные расчеты непрограммисту и нематематику. Автор настоящей статьи некоторое время назад уже высказывался на эту тему в связи с решением типовых гидравлических задач [1]. Приобретенный дополнительный опыт позволяет распространить эти высказывания на область учебных задач по технической термодинамике.

Пакет компьютерной алгебры относится к классу систем автоматизированного проектирования и ориентирован на подготовку интерактивных документов с вычислениями и визуальным сопровождением [3, 4]. У пакета компьютерной алгебры интуитивно понятный, простой интерфейс. Формулы и данные вводятся как с клавиатуры, так и с помощью специальных панелей (палитр) инструментов. Решение выполняется на

рабочем листе с графическим отображением уравнений и выражений. Редактор уравнений функционирует в режиме соответствия («что на экране, то и на бумаге»), что позволяет студенту описывать решение в привычном математическом виде, а это дает возможность сконцентрировать внимание на смысле задачи, а не на работе с программой.

Пакет компьютерной алгебры содержит разнообразный и многочисленный набор операторов и встроенных функций для решения технических задач. Этот пакет демонстрирует процесс построения математической модели, поэтому особенно полезен при решении учебных задач.

Формулы в пакете компьютерной алгебры, как уже было отмечено, записываются в привычном (книжном) виде. Вычисления по формулам осуществляются одновременно с набором. Переменные, формулы и их параметры можно изменять, мгновенно наблюдая изменения результата.

Покажем особенности применения пакета компьютерной алгебры на примере типовой термодинамической задачи 6.19, содержащейся в задачнике Д.Л. Жуховицкого [5], в сравнении с традиционным подходом к ее решению.

Задача 6.19. В воздушном двигателе воздух в количестве 1 кг расширяется от давления $p_1 = (10 + 0,5n_{вар})$ ат до давления $p_2 = 1$ ат (здесь $n_{вар}$ – номер варианта). Расширение может произойти изотермически, адиабатно и политропно с показателем политропы $n = 1,2$. Сравнить работы расширения и определить конечные параметры воздуха по этим трем процессам; начальная температура воздуха $t_1 = 227$ °С. Представить процессы на диаграмме p, v .

Решение состоит из постановочной и вычислительной частей и построения графиков (диаграмм).

Постановка задачи. К термодинамической системе, то есть к воздуху в двигателе, применим уравнение состояния Клапейрона [2]:

$$p \cdot v = R \cdot T, \quad (1)$$

где p – давление, Па; v – удельный объем, м³/кг; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); T – температура, К.

Из уравнения (1) выразим температуру:

$$T = p \cdot v / R. \quad (2)$$

Из уравнения изотермы [2]

$$p \cdot v = \text{const} \quad (3)$$

выразим конечный удельный объем v_2 воздуха при изотермическом расширении через начальный удельный объем v_1 :

$$v_2 = \frac{p_1}{p_2} \cdot v_1. \quad (4)$$

Здесь и далее p_1 и p_2 – начальное и конечное давление воздуха соответственно, Па.
Из уравнения адиабаты [2]

$$p \cdot v^k = \text{const} \quad (5)$$

выразим конечный удельный объем v_2 воздуха при адиабатическом расширении через начальный удельный объем v_1 :

$$v_2 = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/k} \cdot v_1. \quad (6)$$

Здесь и далее k – показатель адиабаты воздуха при нормальных физических условиях (НФУ).

Из уравнения политропы [2]

$$p \cdot v^n = \text{const} \quad (7)$$

выразим конечный удельный объем v_2 воздуха при политропном расширении через начальный удельный объем v_1 :

$$v_2 = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/n} \cdot v_1. \quad (8)$$

Здесь и далее n – показатель политропы воздуха при НФУ.

Работа расширения в изотермическом процессе, Дж/кг:

$$l_{\text{из}} = R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right). \quad (9)$$

Работа расширения в адиабатном процессе, Дж/кг:

$$l_{\text{ад}} = \frac{98\,066,5}{k-1} \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_{2\text{ад}}). \quad (10)$$

Здесь и далее 98 066,5 – переводной коэффициент для давлений.

Работа расширения в политропном процессе, Дж/кг:

$$l_{\text{по}} = \frac{98\,066,5}{n-1} \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_{2\text{по}}). \quad (11)$$

В формулах (10) и (11) $v_{2\text{ад}}$ и $v_{2\text{по}}$ – конечный объем воздуха в адиабатном и политропном процессах соответственно.

Конечная температура воздуха в изотермическом процессе

$$T_{2из} = \frac{98\,066,5 \cdot p_2 \cdot v_{2из}}{R}, \quad (12)$$

в адиабатном процессе

$$T_{2ад} = \frac{98\,066,5 \cdot p_2 \cdot v_{2ад}}{R}, \quad (13)$$

в политропном процессе

$$T_{2по} = \frac{98\,066,5 \cdot p_2 \cdot v_{2по}}{R}. \quad (14)$$

Вычислительная часть. По формулам (4)–(14) вычисляются искомые значения требуемых величин. Порядок и содержание этой части решения в традиционной форме и в пакете компьютерной алгебры совпадают. Разница состоит в том, что в пакете компьютерной алгебры вычисления делаются мгновенно и без ошибок, если, разумеется, формулы введены верно.

Ниже приведены справочные константы, исходные данные и вычислительная часть решения задачи в пакете компьютерной алгебры.

Справочные константы:

газовая постоянная воздуха $R = 287$ Дж/(кг·К);

показатель адиабаты воздуха при НФУ $k = 1,4$;

плотность воздуха при НФУ $\rho = 1,293$ кг/м³;

плотность воды $\rho_v = 1\,000$ кг/м³.

Исходные данные:

номер варианта $n_{вар} = 0$;

начальное давление воздуха $p_1 = 10 + 0,5 \cdot n_{вар} = 10$ ат;

конечное давление воздуха $p_2 = 1$ ат;

начальная температура воздуха $t_1 = 227$ °С;

показатель политропы $n = 1,2$.

Решение:

1) начальная температура воздуха $K T_1 = t_1 + 273,15 = 500,15$;

2) начальный удельный объем воздуха $v_1 = R \cdot T_1 / (98\,066,5 \cdot p_1) = 0,146$ м³/кг;

3) конечный удельный объем воздуха:

в изотермическом процессе $v_{2из} = (p_1 / p_2) \cdot v_1 = 1,464$ м³/кг;

адиабатном процессе $v_{2ад} = (p_1 / p_2)^{1/k} \cdot v_1 = 0,758$ м³/кг;

политропном процессе $v_{2по} = (p_1 / p_2)^{1/n} \cdot v_1 = 0,997$ м³/кг;

4) конечная температура воздуха:

в изотермическом процессе $T_{из} = 98\,066,5 \cdot p_2 \cdot v_{2из} / R = 500,15$;

адиабатном процессе $T_{ад} = 98\,066,5 \cdot p_2 \cdot v_{2ад} / R = 259,051$;

политропном процессе $T_{по} = 98\,066,5 \cdot p_2 \cdot v_{2по} / R = 340,748$;

5) работа расширения:

в изотермическом процессе $l_{12из} = R \cdot T_1 \cdot \ln(p_1 / p_2) = 3,305 \cdot 10^5$ Дж/кг;

адиабатном процессе $l_{12ад} = 98\,066,5 \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_{2ад}) / (k - 1) = 1,73 \cdot 10^5$ Дж/кг;

политропном процессе $l_{12по} = 98\,066,5 \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_{2по}) / (n - 1) = 2,287 \cdot 10^5$ Дж/кг.

Существенная разница в трудоемкости сравниваемых способов решения задач возникает при построении графиков (диаграмм). При традиционном способе графики зависимостей удельных объемов воздуха от давления строятся по точкам, координаты которых вычисляются по формулам, аналогичным выражениям (4), (6) и (8). Каждое вычисление повторяется столько раз, сколько точек требуется для построения графика. Результаты вычислений сводятся в таблицу. Сокращенный ее вариант дан ниже (таблица).

Результаты вычислений для построения графика $p(v)$

Удельный объем, м ³ /кг	Давление, ат		
	Изотермический процесс	Адиабатный процесс	Политропный процесс
0,146	10,000	10,000	10,000
0,500	2,927	1,791	2,290
1,000	1,464	0,679	0,997
1,464	1,000	0,398	0,631

Применение пакета компьютерной алгебры избавляет от необходимости строить графики вручную. И вычисления, и построение графиков проводятся автоматически, мгновенно и безошибочно. Для построения диаграммы в координатах p , v необходимо лишь задать связи между давлением и удельным объемом в виде функциональных зависимостей давления соответствующего процесса от объема:

$$p_{\text{из}}(v) = p_1 \cdot v_1/v; p_{\text{ад}}(v) = p_1 \cdot (v_1/v)^k \cdot p_1; p_{\text{по}}(v) = p_1 \cdot (v_1/v)^n \cdot p_1.$$

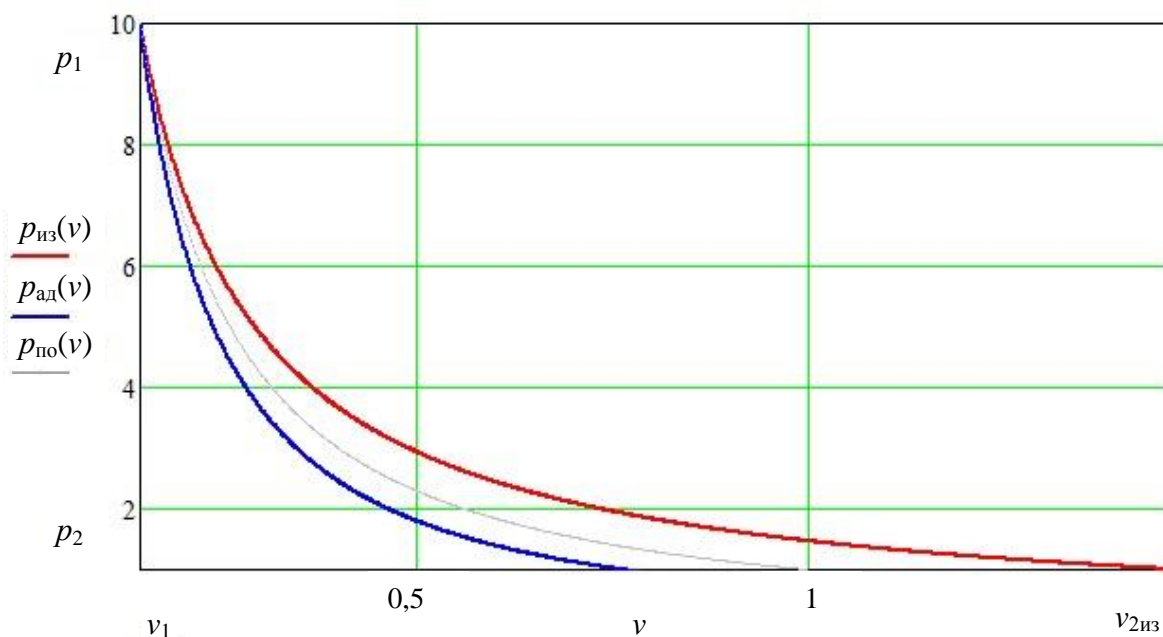
Диаграммы процессов представлены на рисунке.

Преимущества применения пакета компьютерной алгебры при решении типовых термодинамических задач очевидны, однако возникает ряд естественных вопросов:

насколько сложно и длительно овладение техникой пакета компьютерной алгебры для студентов?;

какие ресурсы учебного времени необходимы для обучения студентов навыкам решения задач с помощью пакета?

Опыт автора показывает, что специального тренинга по пакету компьютерной алгебры не требуется: достаточно написать краткие методические указания (инструкцию), сопроводив их несколькими примерами-образцами, и рассмотреть эти образцы на аудиторных практических занятиях в компьютерном классе. Студенты, как правило, с интересом и охотно осваивают пакет компьютерной алгебры. Через некоторое время они самостоятельно решают новые задачи, «перекраивают», трансформируют образцы, копируют и вставляют в свои решения подходящие фрагменты из образцов, приобретая постепенно навыки и накапливая собственный фонд «заготовок» типовых решений. Заметим, что копирование фрагментов из уже решенных задач и редактирование, «привязка» их к условиям решаемой задачи – весьма эффективный прием, заметно ускоряющий процесс решения.



Диаграммы связей давления и удельного объема воздуха при его расширении в изотермическом, адиабатном и политропном процессах

ВЫВОД

Применение пакета компьютерной алгебры при решении типовых термодинамических задач (а также гидравлических задач и многих других) повышает производительность учебного процесса, делает его более привлекательным для студентов и помогает им преодолевать психологический порог «непознаваемости» дисциплины. Студент прилагает сравнительно небольшие дополнительные умственные усилия и существенно экономит время, так как оказывается избавлен от необходимости выполнять рутинные вычисления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Качановский Ф.В. Применение MathCad при решении гидравлических задач // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. Вып. 1 (27). С. 6–10.
2. Ларионов Н.Н. Теплотехника: учебник для вузов. М.: Стройиздат. 1985. 432 с.
3. Семенов М.Г. Математическое моделирование в MathCad. М.: Альтекс-А. 2003. 208 с.
4. Макаров Е.Г. Инженерные расчеты в MathCad 14. СПб.: Питер. 2007. 592 с.
5. Жуховицкий Д.Л. Сборник задач по технической термодинамике: учебное пособие. Ульяновск: УлГТУ. 2004. 98 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. Применение пакета компьютерной алгебры при решении учебных задач по термодинамике // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 3 (15). С. 33–39.

APPLICATION OF A COMPUTER ALGEBRA PACKAGE FOR SOLVING OF TECHNICAL THERMODYNAMIC PROBLEMS

F.V. Kachanovsky

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Characteristic example of MathCad application for solving of technical thermodynamic problems is considered. MathCad methods are compared with traditional methods, which were created in the days of hand computations. Advantages of MathCad are demonstrated.

Keywords: MathCad, technical thermodynamic problem, clapeiron equation, formula, function, computer programme, graph.

REFERENCES

1. Kachanovsky F.V. Application of MathCad in solving hydraulic problems. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2015. Iss. 1 (27), pp. 6–10. (In Russian).
2. Larikov N.N. *Teplotekhnika: uchebnik dlya vuzov* [Heat engineering: a textbook for universities]. Moscow: Stroyizdat. 1985. 432 p.
3. Semenenko M.G. *Matematicheskoye modelirovaniye v MathCad* [Mathematical modeling in MathCad]. Moscow: Alteks-A. 2003. 208 p.
4. Makarov E.G. *Inzhenernyye raschoty v MathCad 14* [Engineering calculations in MathCad 14]. St. Petersburg: Piter. 2007. 592 p.
5. Zhukhovitsky D.L. *Sbornik zadach po tekhnicheskoy termodinamike: uchebnoye posobiye* [Collection of problems in technical thermodynamics: a tutorial]. Ulyanovsk: UIGTU. 2004. 98 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. Application of a computer algebra package for solving of technical thermodynamic problems // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 3 (15), pp. 33–39.

УДК 621.316:005.334

**АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКОЙ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ***К.Б. Корнеев, Ю.М. Павлова, Р. Осей-Овусу**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Корнеев К.Б., Павлова Ю.М.,
Осей-Овусу Р., 2022

Аннотация. Указана необходимость прогнозирования электропотребления, которая требует качественного и количественного анализа существующих графиков нагрузки разных групп электропотребителей. Отмечено, что использование интеллектуальных систем учета позволяет накопить большой объем статистических данных, требующих дальнейшей обработки. Из-за того, что визуальные методы выявления и группировки данных затратны и не всегда точны, предложено производить усреднение собранных статистических данных и выявлять в них типичные профили (паттерны), по которым последующие замеры могут быть отнесены к отдельной группе (кластеру) внутри всей выборки профилей нагрузки.

Ключевые слова: энергосистема, профиль нагрузки, паттерн, прогнозирование, электроанализатор, кластер, анализ, управление, тариф.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-3-40-50

В последние годы новые достижения в области технологий и методов обработки больших данных позволили собрать подробную и хорошо структурированную информацию о поведении промышленных предприятий в области потребления электроэнергии. Такой тип информации может найти множество применений в отрасли распределения электроэнергии, в первую очередь при построении расчетных профилей нагрузки для прогнозирования электропотребления [1].

Энергоснабжающие компании часто используют данные из договоров на поставку электрической энергии о типе предприятия, чтобы присвоить каждому промышленному потребителю метку соответствующего класса. Такой тип сегментации по фиксированным параметрам (числу часов использования максимума нагрузки, форме суточного графика нагрузки, коэффициенту заполнения графика) не может удовлетворить потребности современных предприятий в гибком и динамическом определении режимов производства [2]. Более перспективным выглядит метод сегментации различных типов предприятий на основе моделей их потребления электроэнергии, представленных в данных профиля нагрузки [3]. Анализ результатов по реальным данным профиля нагрузки выявил, что даже в пределах групп потребителей схожего профиля могут наблюдаться значительные расхождения в форме профиля нагрузки.

Широкое применение интеллектуальных счетчиков в составе интеллектуальных сетей Smart Grid открывает огромные возможности, но тем не менее создает проблемы для операторов рынка распределения электроэнергии [4, 5]. Значительные инвестиции в усовершенствованную инфраструктуру измерения (умные счетчики) позволяют хорошо

отслеживать, контролировать, управлять и оптимизировать интеллектуальные сети, а также обеспечивать хорошее обслуживание клиентов. С другой стороны, поставщики электроэнергии сталкиваются с более серьезными проблемами при работе с большими данными из-за необходимости соответствовать возрастающим требованиям со стороны потребителей, часть которых становятся полноправными участниками рынков электроэнергии и мощности, так как выходят на рынок производства электрической энергии. Эти требования включают надежность и эффективность, безопасность и защищенность, прибыльность и требования по реализации развивающейся интеллектуальной сети, которая может обслуживать неоднородную клиентскую базу.

Данные интеллектуального измерения часто демонстрируют существенные изменения с течением времени. Характерные модели поведения (энергопотребления) применительно не только к электроэнергии, но и другим видам энергоресурсов стали называть паттернами (заимствовано отечественной наукой из западных дисциплин). Наличие долговременной статистики потребления позволяет не только анализировать статистический материал, но и оценивать эволюцию профилей потребления, прогнозировать их динамику, предсказывать форму профиля для сходных групп предприятий. Тем не менее непосредственный анализ часто бывает невозможным или крайне затруднительным, так как такие выборки в масштабах целой страны (или даже отдельного региона) могут быть чрезвычайно большими, иметь несопоставимые размерности (требовать перехода от абсолютных единиц к относительным), демонстрировать сезонные колебания, а также зависимость от географических факторов. Кроме того, для энергоснабжающих компаний сбор и анализ профилей нагрузки всех потребителей подчас оказываются не такими интересными в экономическом плане, поэтому предпочтение отдается использованию графика характерных суток. Следовательно, результаты анализа таких не полностью достоверных профилей (паттернов) могут привести к неверному планированию, что отрицательно скажется на надежности и экономичности сети [6]. Как правило, большинство исследований проводилось на основе усреднения и построения графиков по средневзвешенным значениям без учета указанных выше особенностей. Изредка для особо характерных видов нагрузки, вроде сельского хозяйства, строятся отдельные сезонные (летний и зимний) графики. При этом в Российской Федерации такие исследования последнее время не проводятся, чаще всего используются графики, полученные во времена СССР.

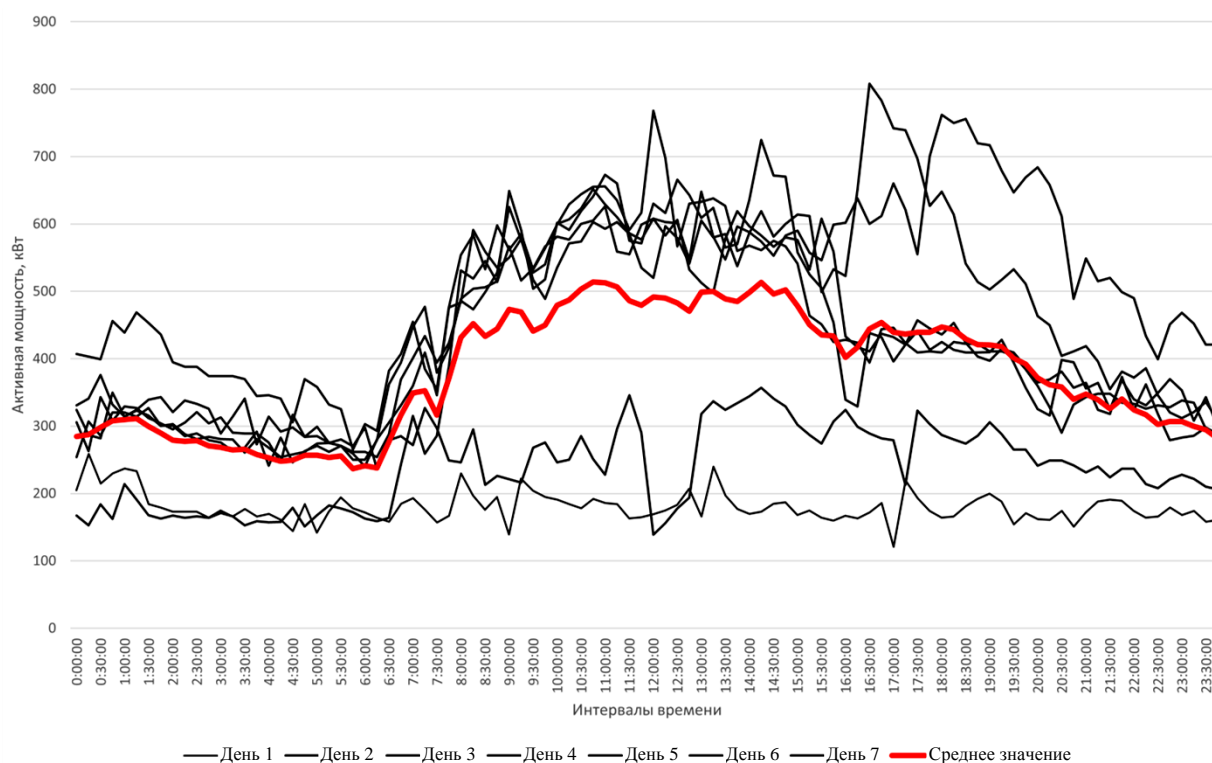
В ходе работ по энергетическим обследованиям и составлению энергетических паспортов, выполнявшихся в 2003–2021 годах научно-образовательным центром «Энергоэффективность» ТвГТУ, было произведено большое количество измерений на электрических подстанциях промышленных предприятий Тверской области, а также на сетевых подстанциях [7]. Экспериментальные результаты были получены с использованием данных анализаторов качества и количества электрической энергии CircutorAR-5, собранных с 15-минутными интервалами. В некоторых случаях (при измерении на предприятиях с резко изменяющейся нагрузкой) интервалы измерений были уменьшены до 5 мин. Было отмечено, что для ряда больших промышленных предприятий с несколькими цехами наблюдалось рассогласование графиков отдельных цехов, что приводит к «размазыванию» формы графика предприятия в целом, особенно при формировании графика по данным за несколько дней.

Цель работы заключалась в том, чтобы построить график потребления, соответствующий режимам производства нескольких типов заводов, на основе их модели

ежедневного энергопотребления. Следовательно, необходимо проанализировать данные за один день, а не за неделю или месяц. Однако визуальный анализ всех профилей отдельных нагрузок является сложным, трудоемким процессом.

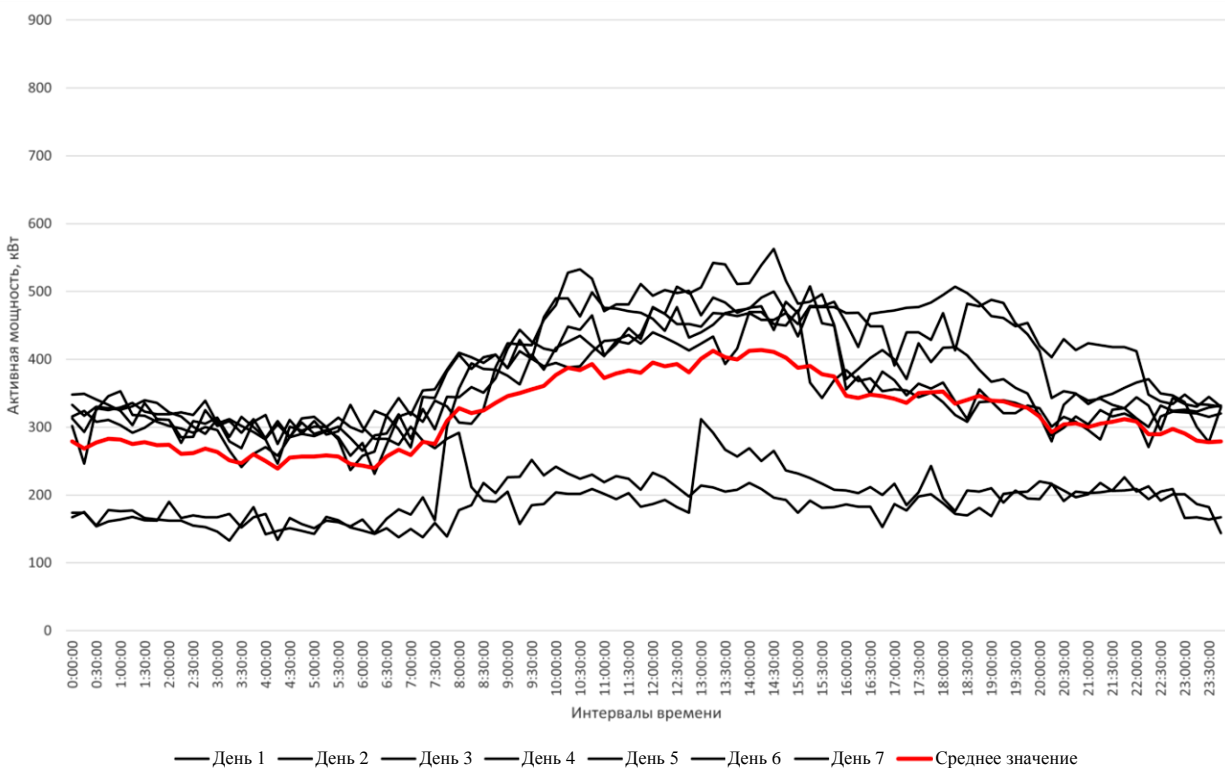
В реальных условиях, когда для сбора данных о профиле электропотребления используются данные автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ), возможно возникновение ошибок, связанных с потерей или изменениями величин передаваемых данных. Причинами возникновения ошибок могут быть рассинхронизация часов систем сбора информации и измерительных комплексов; помехи в каналах связи; обрыв линии (при проводном подключении); аварийные режимы в участках электрической сети и т. д. Установить причины (а тем более – исправить или восполнить недостающие данные) не всегда представляется возможным. В связи с этим сильно изменяющиеся данные, выходящие за предельные значения для характерного графика, рекомендуется не учитывать.

Стоит отметить, что даже на одном и том же предприятии на силовых вводах в разных трансформаторах наблюдаются в целом схожие по форме, но отличные по величине графики. Примеры таких усредненных графиков, построенных по результатам синхронных измерений за неделю на перерабатывающем предприятии, расположенном в Тверской области, приведены на рис. 1. Для возможности сравнения оба графика нормированы от одинаковой предельной мощности, равной 900 кВт.



а

Рис. 1. Суточные и усредненные графики за неделю измерений на трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ предприятия для трансформатора: а – № 1; б – № 2



б

Рис. 1. Продолжение

Как можно увидеть по графикам, в целом наблюдается сходная картина, характерная для промышленных предприятий: наличие большого однородного пика, приходящегося на интервал времени с 8 до 17 часов с последующим снижением в ночной период. Тем не менее при просмотре в таком виде (по абсолютным значениям) графики выглядят в целом похоже, но воспринимаются по-разному. Чтобы оценить их вариативность, провели сравнение (рис. 2).

Два графика были нормированы относительно своего максимального значения (в долях единицы), а затем оба построены в одной системе координат. Различия в относительных значениях также представлены на рис. 2 (в виде отдельного графика).

Как видно из рис. 2, при переходе от абсолютных значений мощности к относительным, сходство усредненных суточных графиков мощности значительно увеличивается, максимальное расхождение не превышает 0,12 относительных единиц. Тем не менее, если сравнить усредненные графики с фактическими суточными (обозначенные красными и черными линиями на рис. 1), то можно заметить, что реальные достаточно сильно могут отличаться от усредненных и не всегда позволяют сопоставить реальный график и усредненный «профиль».

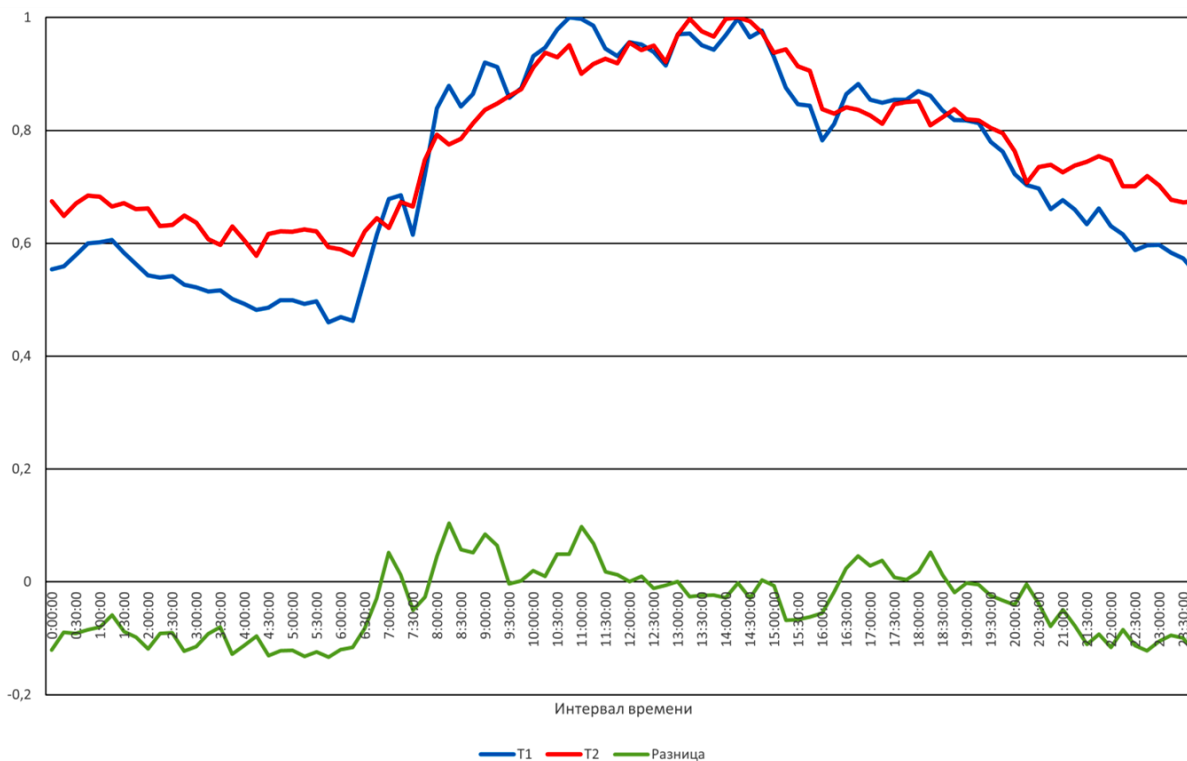


Рис. 2. Сравнение формы суточных графиков усредненной мощности на трансформаторах № 1 и 2 предприятия

С ростом количества собранных данных для графиков среднее значение для сходных предприятий будет выравниваться, что приведет к возможности обработки этих графиков уже не через визуальное подобие, а с помощью методов математической статистики. При этом большая часть графиков будет подчиняться одному из типовых распределений. Как правило, для естественных событий (а изменение мощности в цехах и на предприятиях с большим количеством электроприемников разной мощности можно отнести к естественным событиям) достаточно высокую точность показывает описание с помощью нормального (Гауссова) распределения. При этом на некоторых участках даже усредненных графиков можно выявить незначительные колебания значений, которые фактически не влияют на общую форму. Значит, такими вариациями можно пренебречь, чтобы «очистить» график от вариаций, и не утратить при этом общей формы графика.

В этом случае фактические значения мощности для любых исследуемых предприятий могут сравниваться полученными ранее графиками мощности и с помощью метода k -средних сопоставляться с уже сформированными паттернами. Если график соотносится с имеющимися кластерами схожих «паттернов» с определенной степенью достоверности, то этому графику присваивается тот же тип, что и всем другим в этом кластере. Если же причислить график к уже сложившимся кластерам не удастся, то этот график может сформировать впоследствии свой собственный, специфичный кластер.

Как правило, многие предприятия формируют типовую картину электропотребления. При этом с ростом количества замеров средние значения многодневных замеров у похожих организаций приобретают сходный вид. Тем не менее не всегда такие фирмы, а также одни и те же предприятия в течение продолжительного

времени формируют сходные графики [8]. Для примера на рис. 3 приведены два графика: для металлообрабатывающего предприятия с двухсменным графиком работы (рис. 3а) и для предприятия по выпуску изделий из пластмасс (рис. 3б). Как видно из рис. 3, первый график сохраняет четкую форму при многократном наложении суточных графиков, а на втором почти невозможно выявить закономерность. Это связано в первую очередь с тем, что вторая организация выпускает нестандартизированный модельный ряд, для которого характерны разные периоды использования технологического оборудования, а также значительные вариации в загрузке единичных мощностей. Поэтому первое предприятие легко по суточному графику может быть отнесено к определенному паттерну, а второе, возможно, и нет. Описанный подход к кластеризации приводит к содержательной сегментации предприятий, отражающей производственные операции, а не опирающейся только на отраслевую специализацию. Указанная сегментация может применяться в электросетевых и энергосбытовых компаниях (например, при разработке переменных ставок тарифов).

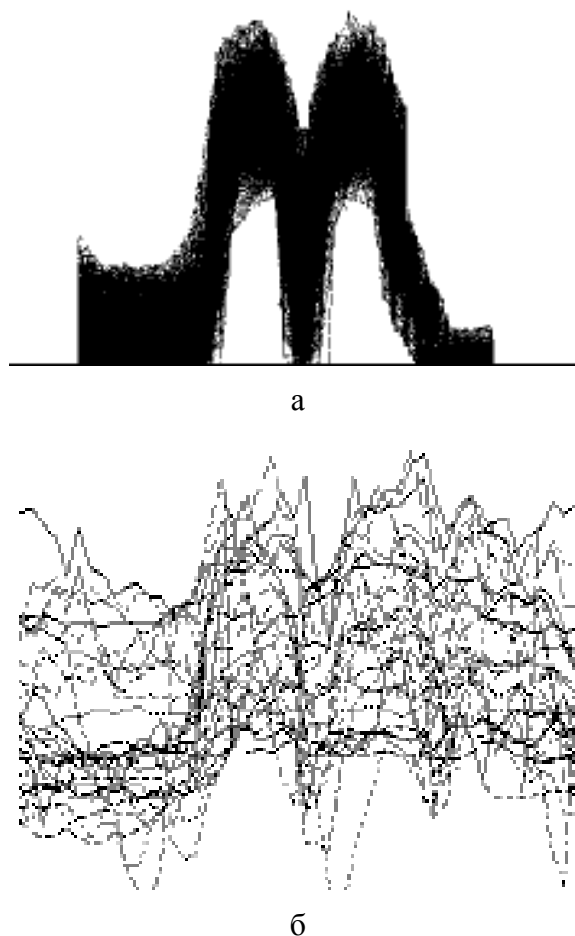


Рис. 3. Многодневные суммарные графики: а – металлургического предприятия с двухсменным режимом работы; б – предприятия по выпуску изделий из пластмасс с графиком, определяемым выпуском изделий

В настоящее время доступность данных о потреблении энергии открывает уникальные возможности для разработки стратегий сегментации промышленного использования энергии с применением данных интеллектуальных сетей по сбору показателей электропотребления. Внедрение интеллектуальных счетчиков способствовало появлению исследований по моделированию временных рядов с высоким разрешением и кластеризации клиентов.

Значительный объем данных интеллектуальных счетчиков обуславливает необходимость появления новых подходов для поддержания реакции спроса, разработки программ повышения энергоэффективности и обеспечения эффективного таргетирования потребителей [9]. Не все из большого количества алгоритмов кластеризации в должной мере позволяют соотнести графики нагрузки со специфическими «паттернами поведения» электропотребителя. Кроме того, существующие алгоритмы по большей части не ориентированы на определение характеристик кластеризации клиентов. Они извлекают профили нагрузки из данных об электроэнергии с учетом глобальных характеристик моделей энергопотребления, а не локальных, характерных для отдельного интервала времени. Более того, эти алгоритмы часто оперируют всеми пространствами функций входного набора данных, чтобы изучить как можно больше информации, что снижает производительность из-за невозможности обнаружить скрытые закономерности в «зашумленных» и неактуальных измерениях. Масштабируемость – еще одна важная проблема алгоритмов профилирования нагрузки, так как с увеличением количества интеллектуальных систем учета (и, соответственно, данных) будет наблюдаться переход от ярко очерченных кластеров, специфичных для похожих типов потребителей, к появлению переходных групп, размывающих границы между отдельными категориями.

Выбор функций для алгоритма кластеризации играет важную роль, так как правильно подобранные функции способствуют повышению качества в случае машинного обучения и интеллектуального анализа данных. Подходы к указанному выбору можно разделить на методы обертки и фильтрации. Методы обертки заключаются в выборе функций процесса обучения; с помощью этих методов исследуют возможности, которые улучшают выполнение задачи обучения алгоритма (как правило, тренировки нейронной сети). Методы фильтрации способствуют изучению внутренних характеристик данных; эти методы помогают выбрать приоритетные функции в соответствии с некоторым критерием перед запуском задачи обучения. Методы обертки в вычислительном отношении значительно дороже, чем методы фильтрации, поскольку зависят от многократного развертывания обучающих моделей (до тех пор, пока не будет найдено подмножество соответствующих функций).

Некоторые из существующих методов фильтрации невозможно проконтролировать. Например, оценку Лапласа измеряют, чтобы отвергнуть способность функции сохранять локальность. Этот подход основан на наблюдении, что две точки данных, вероятно, связаны с одним и тем же объектом, если они расположены близко друг к другу. Фактически в различных задачах обучения, таких как классификация, локальная структура пространства данных более важна, чем глобальная. Оценка разреженных k -средних использует «штраф» для выбора функций. Это наиболее простой и действенный подход при разработке методов выбора функций для разреженных k -средних. Дисперсия данных может быть самой простой неконтролируемой оценкой характеристик. Но хотя эта дисперсия входит в перечень функций, которые полезны для описания данных [10], не стоит ожидать, что подобные функции должны быть полезны для различения данных в

разных классах. В связи с этим приходится оперировать не численным показателем для описания класса, а либо сводить данные к функциональному описанию, либо унифицировать кластерную модель описания и представлять график потребления в виде указателя на отдельный кластер унифицированного поля описаний моделей электропотребления.

Одним из возможных применений сегментации предприятий по схемам потребления электроэнергии является разработка переменных ставок тарифов на электроэнергию для снижения пиковых нагрузок интеллектуальной сети. Экономические выгоды от таких изменяющихся во времени тарифов на электроэнергию вполне оправданы. Однако разработка переменных тарифов требует разделения потребителей электроэнергии в зависимости от профилей их нагрузки. Специфический для сегмента тарифный план обуславливает изменяющийся во времени тариф для каждого отдельного предприятия или группы предприятий. Как указано в [11, 12], проектирование тарифов для конкретных сегментов представляет собой сложный процесс, требующий определения количества часовых поясов, времени начала всех часовых поясов, общего количества ценовых поясов и рентабельности поставщиков. В этом процессе первый необходимый шаг – сегментация пользователей по профилям нагрузки. Полученные результаты будут полезны энергоснабжающим предприятиям при разработке стратегии увеличения прибыли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матюнина Ю.В., Кудрин Б.И., Жилин Б.В. Электроснабжение потребителей и режимы: учебное пособие для вузов. М.: МЭИ. 2013. 412 с.
2. Ополева Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов: учебное пособие. М.: Форум. 2019. 416 с.
3. Устюгов Н.В., Проталинский О.М. Математическая модель потребления электроэнергии в организационно-технической системе // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика»*. 2020. № 3. С. 116–124.
4. Ледин С.С. Интеллектуальные сети Smart Grid – будущее российской энергетики // *Автоматизация и ИТ в энергетике*. 2010. № 11 (16). С. 4–8.
5. Бубенчиков А.А., Горлинский Н.А., Щербинов В.В., Сикорский С.П., Кулак К.С. Умные сети, Smartgrid. Автоматизация производства преобразования и распределения // *Молодой ученый*. 2016. № 28.2 (132.2). С. 14–18.
6. Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур. Сыктывкар: КНЦ УрО РАН. 2008. 78 с.
7. Енин А.С., Корнеев К.Б., Узикова Т.И. Изменения в проведении энергетического обследования и представлении его результатов // *Тверской государственный технический университет – опорный региональный вуз в подготовке инженерных кадров: Сборник тезисов докладов внутривузовской научно-практической конференции преподавателей и сотрудников Тверского государственного технического университета*. Тверь: ТвГТУ. 2015. С. 145–147.
8. Imran Khan, Joshua Zhexue Huang, MdAbdul Masud, Qingshan Jiang. Segmentation of factories on electricity consumption behaviors using load profile data // *IEEE Access*. 2016. Vol. 4, pp. 8394–8406.

9. 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»*. 2011. № 3 (11). С. 50–65.
10. Электроснабжение: методические указания к практическим занятиям и лабораторным работам для студентов дневной и заочной форм обучения спец. 140400 / сост. А.С. Енин. Тверь: ТвГТУ. 2015. 16 с.
11. Flath C., Nicolay D., Lilia F. Cluster analysis of smart metering data // *Business & Information Systems Engineering: The International Journal of Wirtschaftsinformatik*. 2012. Vol. 4. No. 1, pp. 31–39.
12. Электроэнергетика России 2030: Целевое видение / под общ. ред. Б.Ф. Вайнзихера. М.: Альпина Бизнес Бук. 2008. 360 с.

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

ПАВЛОВА Юлия Михайловна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

ОСЕИ-ОВУСУ Раймонд – аспирант кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: orajmond2008@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Осеи-Овусу Р. Алгоритмические модели управления электрической нагрузкой в системах электроснабжения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 40–50.

ALGORITHMIC MODELS OF ELECTRIC LOAD CONTROL IN POWER SUPPLY SYSTEMS

K.B. Korneev, Yu.M. Pavlova, R. Osei-Ovusu
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The necessity of power consumption forecasting is indicated, which requires a qualitative and quantitative analysis of existing load curves for different groups of power consumers. It is noted that the use of intelligent accounting systems allows you to accumulate a large amount of statistical data that require further processing. Due to the fact that visual methods for identifying and grouping data are costly and not always accurate, it is proposed to average the collected statistical data and identify typical profiles (patterns) in them, according to which subsequent measurements can be attributed to a separate group (cluster) within the entire sample of load profiles.

Keywords: power system, load profile, pattern, forecasting, electrical analyzer, cluster, analysis, control, tariff.

REFERENCES

1. Matyunina Yu.V., Kudrin B.I., Zhilin B.V. *Elektrosnabzheniye potrebiteley i rezhimy: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [Power supply of consumers and power modes: a textbook for universities]. Moscow: MEI. 2013. 412 p.
2. Opoleva G.N. *Elektrosnabzhenie promyshlennih predpriyatiy i gorodov: uchebnoye posobiye* [Power supply of industrial enterprises and cities: a textbook]. Moscow: Forum. 2019. 416 p.
3. Ustyugov N.V., Protalinskiy O.M. Mathematical model of electricity consumption in the organizational and technical system. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Upraleniye, vychislitel'naya tekhnika I informatika»*. 2020. No. 3, pp. 116–124. (In Russian).
4. Ledin S.S. Intelligent networks of Smart Grid – the Future of Russian energetics. *Avtomatizatsiya i IT v energetike*. 2010. No. 11 (16), pp. 4–8. (In Russian).
5. Bubenchikov A.A., Gorlinskiy N.A., Scherbinin V.V., Sikorskiy S.P., Kulak K.S. Smart networks, Smartgrid. Automation of the production of energy conversion and distribution. *Molodoy ucheniy*. 2016. No. 28.2 (132.2), pp. 14–18. (In Russian).
6. Shumilova G.P., Gotman N.E., Startseva T.B. Prognozirovaniye elektricheskikh nagruzok pri operativnom upravlenii elektroenergeticheskimi sistemami na osnove neyrosetevykh struktur [Forecasting of electrical loads in the operational management of electric power systems based on neural network structures]. Syktyvkar: IB FRC Komi SC UB RAS. 2008. 78 p.
7. Enin A.S., Korneev K.B., Uzikova T.I. Changes in the conduct of an energy survey and the presentation of its results. *Tver State Technical University – a key regional university in the training of engineering personnel: Collection of abstracts of reports of the intra-university scientific and practical conference of teachers and employees of Tver State Technical University*. Tver: TvGTU. 2015. pp. 145–147. (In Russian).
8. Imran Khan, Joshua Zhexue Huang, Md Abdul Masud, Qingshan Jiang. Segmentation of factories on electricity consumption behaviors using load profile data. *IEEE Access*. 2016. Vol. 4, pp. 8394–8406.
9. Marinova S.V. Power consumption forecasting as a sphere of a systematic approach and experimental solutions based on existing models and methods. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i himicheskie tekhnologii»*. 2021. No. 3 (11), pp. 50–65. (In Russian).
10. *Elektrosnabzheniye: metodicheskiye ukazaniya k prakticheskim zanyatiyam i laboratornym rabotam dlya studentov dnevnoy i zaочноy form obucheniya spets.* [Power supply: guidelines for practical exercises and laboratory work for full-time and part-time students spec. 140400]. Comp. A.S. Enin. Tver: TvSTU. 2015. 16 p.
11. Flath C., Nicolay D., Lilia F. Cluster analysis of smart metering data. *Business & Information Systems Engineering: The International Journal of Wirtschaftsinformatik*. 2012. Vol. 4. No. 1, pp. 31–39.
12. *Elektroenergetika Rossii 2030: Tselevoye videniye* [Electric power industry of Russia 2030: Target vision] / ed. by B.F. Vajnzher. Moscow: Alpina Business Book. 2008. 360 p.

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

PAVLOVA Yulia Mikhailovna – Senior Lecturer 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: sokolhawk98@gmail.com

OSEI-OWUSU Raymond – Graduate Student 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: orajmond2008@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Korneev K.B., Pavlova Yu.M., Osei-Ovusu R. Algorithmic models of electric load control in power supply systems // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 3 (15), pp. 40–50.

УДК 44.31.03:45.43.00:53.07.00

**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОТКРЫТЫХ В РОССИИ (В ТВГТУ)
ЗАКОНОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ И ФАКЕЛОВ**

А.Н. Макаров

Тверской государственной технической университет (г. Тверь)

© Макаров А.Н., 2022

Аннотация. Дано описание открытых автором фундаментальных законов физики, законов теплового излучения ионизированных и неионизированных газовых объемов. На основе открытых законов разработана современная теория теплообмена и методики расчета теплообмена в электродуговых и факельных металлургических печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок электростанций. Сделан вывод, что использование научного открытия позволяет создавать инновационные электродуговые сталеплавильные печи, факельные нагревательные печи, топки, камеры сгорания, в которых снижается потребление электроэнергии и топлива, повышаются производительность и ресурс работы, уменьшается количество вредных выбросов в окружающую среду.

Ключевые слова: теплообмен, тепловое излучение, электрическая дуга, факел, печи, топки, камеры сгорания.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-3-50-58

ВВЕДЕНИЕ

В отечественной металлургии и в мире 40 % стали производят в дуговых сталеплавильных печах (ДСП), 60 % – в кислородных конверторах. В машиностроении и литейном производстве используют около 1 000 ДСП (пример подобной печи представлен на рис. 1). Дуговые сталеплавильные печи – сверхмощные потребители электроэнергии: мощность ДСП составляет 90–120 МВА, что равно 75 % мощности, потребляемой областным центром с населением в 500 000 человек и расположенной в ней промышленностью. До конца XX века (до 1980 года) электрическая дуга (основной источник теплового излучения в ДСП) представляла собой «черный ящик», неисследованный объект [1–3].



Рис. 1. Дуговая сталеплавильная печь вместимостью 6 т металла

В 1979–1982 годах автор разработал геометрическую, физическую, математическую модель электрической дуги как цилиндрического газового ионизированного излучающего объема и на основе модели создал методику расчета теплообмена в ДСП. В 2010-е годы формула для расчета теплового излучения электрической дуги была названа автором первым законом теплового излучения цилиндрического газового объема. В 1983–1992 годах он разработал пионерскую теорию теплообмена в ДСП и изложил ее в монографии [4].

В России на тепловых электростанциях (рис. 2) установлено около 2 000 энергоблоков (мощностью от 30 до 1 200 МВт). В топках паровых котлов сжигают 80–85 % добываемых и используемых в мире, в том числе и в России, топливно-энергетических ресурсов. В XX–XXI веках широкое распространение получило факельное сжигание в топках, печах, камерах сгорания газотурбинных установок газообразного, жидкого, пылевидного топлива.

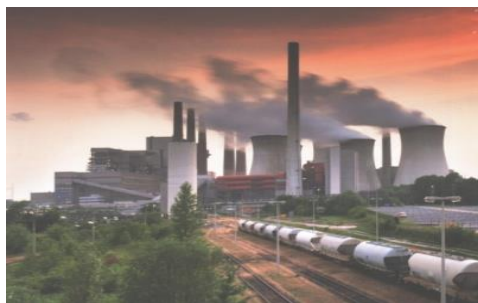


Рис. 2. Тепловая электрическая станция

Для факельного сжигания топлива характерно объемное излучение, а именно трехмерная модель излучения. Теплообмен излучением составляет 90–98 % суммарного теплообмена в топках паровых котлов, факельных нагревательных и электродуговых сталеплавильных печах, камерах сгорания газотурбинных установок [1–5]. В факеле, электрической дуге излучают квадриллионы атомов; излучение каждого атома на расчетную площадку необходимо учесть, что является сверхсложной проблемой. Для расчета теплового излучения факела на расчетную площадку необходимо решить трехкратные интегральные уравнения теплообмена излучением. Решение трехкратных интегральных уравнений для определения потоков теплового излучения, угловых коэффициентов излучения факела на расчетную площадку, средней длины пути лучей от излучающих атомов до расчетной площадки в XX веке не было найдено, факел также представлял собой «черный ящик». В существующих методах расчета (зональном, численном, Р1-аппроксимации, Монте-Карло, Шварцшильда – Шустера, Эддингтона, Чандрасекара, сферических гармоник [1–3]) используются закон теплового излучения абсолютно черного тела, закон Стефана – Больцмана; погрешность расчетов составляет 70–90 % и более, так как излучение газовых объемов не подчиняется закону Стефана – Больцмана [5].

ЗАКОНЫ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДУГ И ФАКЕЛОВ

В 1996–2001 годах автором были открыты фундаментальные законы физики, законы теплового излучения газовых объемов факелов, законы излучения цилиндрических газовых объемов (табл. 1) [5–8]. В таблице использованы обозначения:

q – плотность потока теплового излучения падающего от цилиндрического газового объема на расчетную площадку, кВт/м²;

ϕ – угловой коэффициент излучения (доля излучения) цилиндрического газового объема на расчетную площадку;

P – мощность излучения цилиндрического газового объема, кВт;

k – коэффициент поглощения цилиндрического газового объема;

l – средняя длина пути лучей от всех атомов цилиндрического газового объема до расчетной площадки, м;

F – площадь поверхности расчетной площадки, м².

Индексы обозначают номера газовых объемов от 1 до n .

Таблица 1

Законы теплового излучения газовых объемов факелов (законы Макарова)

Номер закона	Математическая запись закона	Формулировка закона
1	2	3
I	$q_{FdF} = \frac{\phi_{F_0dF} \cdot P_F \cdot e^{-kl}}{F_0} = \frac{\phi_{F_0dF} \cdot P_F}{F_0 \cdot e^{kl}}$	Плотность потока теплового излучения, падающего от газового объема на расчетную площадку, прямо пропорциональна его мощности, угловому коэффициенту излучения и обратно пропорциональна коэффициенту поглощения, средней длине пути лучей от всех атомов объема до площадки и площади площадки

Окончание табл. 1

1	2	3
II	$l_1 = l_2 = l_3 = \dots = l_i = \left(\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{n} \right) = l$	Средняя длина пути лучей от квадриллионов излучающих атомов объема до расчетной площадки равна среднеарифметическому расстоянию от оси симметрии объема до площадки
III	$\phi_{F_1dF} = \phi_{F_2dF} = \phi_{F_3dF} = \dots = \phi_{F_idF}$	Угловые коэффициенты излучения коаксиальных цилиндрических газовых объемов на расчетную площадку равны
IV	$q_{F_1dF} = q_{F_2dF} = q_{F_3dF} = \dots = q_{F_idF}$	Плотности потоков излучений коаксиальных цилиндрических газовых объемов на расчетную площадку равны
V	$q_{F_idF} = \sum_{i=1}^n q_{F_idF}$	Плотности потоков тепловых излучений цилиндрического газового объема большого диаметра и его цилиндрической оси симметрии на расчетную площадку равны при равенстве выделяющихся в них тепловых мощностей

С целью соблюдения многовековых научных традиций и авторского права законы теплового излучения газовых объемов факелов в дипломе на научное открытие, статьях, учебнике, монографиях, аналогично законам излучения абсолютно черного тела (законам Стефана – Больцмана, Планка, Вина), названы фамилией автора, их открывшего, а именно законами Макарова. На основе научного открытия автором разработана теория и методики расчета теплообмена [5–11] в факельных печах (рис. 3), топках паровых котлов, камерах сгорания (рис. 4) газотурбинных установок (рис. 5), газотурбинных двигателей гражданской авиации.



Рис. 3. Факельная печь для обжига кирпича

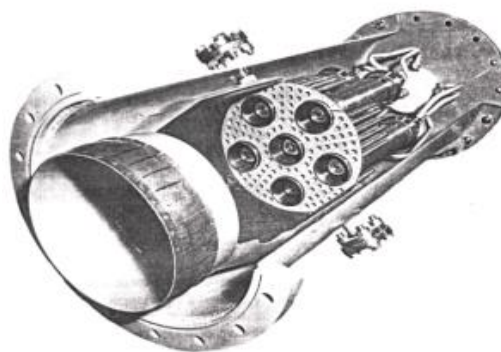


Рис. 4. Камера сгорания газотурбинной установки

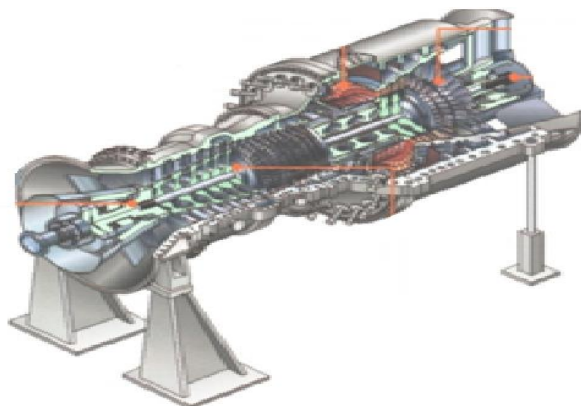


Рис. 5. Газотурбинная установка мощностью 295 МВт

Благодаря открытым законам теплового излучения газовых объемов была решена сверхсложная задача расчета с помощью одной формулы излучения квадриллионов атомов факела на любую расчетную площадку в печах, топках, камерах сгорания.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛООБМЕНА В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ И ФАКЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ, ТОПКАХ, КАМЕРАХ СГОРАНИЯ

Открытые законы обладают мультидисциплинарностью и используются в металлургии, энергетике, различных отраслях промышленности. Согласно открытым законам, в газовые объемы факелов вписываются цилиндрические газовые объемы (рис. 6), излучение которых в расчетах моделируется эквивалентным излучением их цилиндрической оси симметрии (см. закон V в табл. 1).

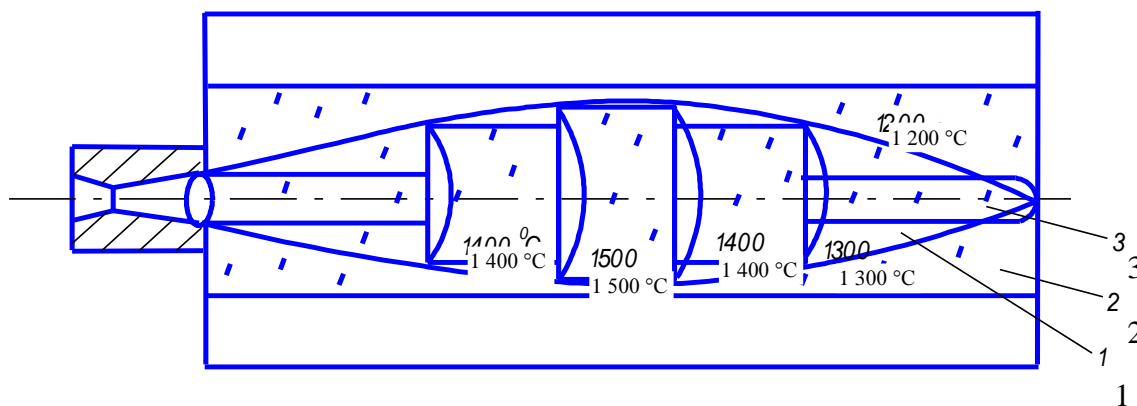


Рис. 6. Геометрическая модель факела в виде цилиндрических газовых объемов:
1 – факел; 2 – продукты горения; 3 – цилиндрические газовые объемы разного диаметра

Основные формулы методики расчета теплообмена в ДСП, факельных печах, топках, камерах сгорания изложены в табл. 2, в которой использованы условные обозначения:

q_{in} – плотность теплового потока, падающего на i -ю элементарную площадку на поверхности нагрева;

$q_{in\phi}$ – плотность потока теплового излучения, падающего на i -ю площадку от факела, с учетом поглощения излучения факела;

$q_{ino.\phi}$ – плотность потока теплового излучения, падающего на i -ю площадку b , вызванного отражением излучения факела от стен, пода, свода, изделий;

$q_{inп}$ – плотность потока теплового излучения, падающего на i -ю площадку от излучающих стен, пода, крышки, с учетом отражения и поглощения излучения;

$q_{ino.п}$ – плотность потока теплового излучения, падающего на i -ю площадку, вызванного отражением излучения поверхностей от стен, пода, крышки, слитков;

q_{ikon} – плотность конвективного потока факела и продуктов сгорания на i -ю площадку;

q_{inn} – плотность потока излучения продуктов сгорания на i -ю площадку;

$\varphi_{\phi ji}$ – локальный угловой коэффициент излучения j -го цилиндрического источника на i -ю площадку;

$P_{\phi j}$ – мощность j -го цилиндрического источника;

F_i – площадь i -й элементарной площадки;

$\psi_{\phi jk}$ – обобщенный угловой коэффициент излучения j -й объемной зоны (j -го цилиндрического источника) на k -ю поверхность;

$\varphi_{\phi jk}$ – средний угловой коэффициент излучения j -го цилиндрического источника на k -ю поверхность;

φ_{ji} – локальный угловой коэффициент излучения j -й поверхности на i -ю площадку;

Q_{jc} – поток собственного излучения j -й поверхности;

$t_n = 20^\circ\text{C}$ – температура изделий;

$t_{г. ср} = 1400^\circ\text{C}$ – средняя температура продуктов горения, газа;

$\alpha_{кон}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией (при свободной конвекции $\alpha_{кон} = 11,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ в начале нагрева $q_{ikon} = 16,2 \text{ кВт}/\text{м}^2$);

φ_{ncji} – локальный угловой коэффициент излучения j -го объема продуктов сгорания на i -ю площадку;

P_{ncj} – мощность j -го объема продуктов сгорания;

ε_j – коэффициент излучения j -й поверхности;

c_s – излучательная способность абсолютно черного тела;

T_j – температура поверхности;

F_j – площадь j -й поверхности.

Таблица 2

Уравнения, формулы для расчета теплообмена в факельных печах, топках, камерах сгорания по законам излучения газовых объемов

№ п/п	Наименование формулы, уравнения	Уравнение, формула	Единица измерения
1	Плотность суммарного теплового потока, падающего на расчетную площадку	$q_{in} = q_{in\phi} + q_{ino.\phi} + q_{inп} + q_{ino.п} + q_{ikon} + q_{inп}$	кВт/м ²
2	Доля мощности, выделяющаяся в газовом объеме факела	$P_1 : P_2 : \dots : P_n = T_1^3 V_1 : T_2^3 V_2 : \dots : T_n^3 V_n$	–

Окончание табл. 2

1	2	3	4
3	Плотность теплового потока излучения, падающего на расчетную площадку от факела (первый закон теплового излучения цилиндрических газовых объемов)	$q_{in\phi} = \sum_1^n \frac{\varphi_{\phi ji} P_{\phi j}}{F_i} e^{-kl}$	кВт/м ²
4	Плотность теплового потока излучения, вызванного отражением излучения факела от поверхностей на расчетную площадку	$q_{ino.\phi} = \sum_1^n \frac{P_{\phi j}(\psi_{\phi jk} - \varphi_{\phi jk} e^{-kl})}{F_k}$	кВт/м ²
5	Плотность теплового потока излучения, падающего на расчетную площадку от излучающих поверхностей	$q_{in\pi} = \sum_1^n \frac{\varphi_{ji} Q_{jc}}{F_i} e^{-kl}$	кВт/м ²
6	Плотность теплового потока излучения, вызванного отражением излучения поверхностей и падающего на расчетную площадку	$q_{ino.\pi} = \sum_1^n \frac{Q_{jc}(\psi_{jk} - \varphi_{jk} e^{-kl})}{F_k}$	кВт/м ²
7	Плотность конвективного потока от факела и продуктов сгорания на расчетную площадку	$q_{икон} = \alpha_{кон}(t_{г. ср} - t_{и})$	кВт/м ²
8	Плотность потоков излучения продуктов сгорания на расчетную площадку	$q_{inc} = \sum_1^n \frac{\varphi_{псji} P_{псj}}{F_i} e^{-kl}$	кВт/м ²
9	Поток собственного излучения поверхности	$Q_{jc} = \varepsilon_j c_s (T_j/100)^4 F_j$	кВт/м ²

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытые законы теплового излучения газовых объемов и разработанная на их основе методика используются для расчета теплообмена в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов электростанций, камерах сгорания газотурбинных установок электростанций [4–9]. На основе выполненных расчетов разработаны защищенные несколькими десятками патентов электродуговые сталеплавильные печи, факельные печи, топки паровых котлов [10, 11], в которых снижается расход электроэнергии, топлива, повышается производительность, увеличивается срок службы отдельных узлов оборудования: водоохлаждаемых панелей в ДСП, горелок в топках паровых котлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков А.Н. Теплообмен излучением. М.: Энергоатомиздат. 1991. 432 с.

2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир. 1975. 934 с.
3. Телегин А.С. Теплотехнические расчеты металлургических печей. М.: Metallurgy. 1993. 368 с.
4. Макаров А.Н., Свенчанский А.Д. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей. М.: Энергоатомиздат. 1992. 96 с.
5. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань. 2014. 384 с.
6. Makarov A.N. Theory of radioactive heat exchange in fire boxes, fireboxes, combustion chambers is replenished by four new laws // *Science Discovery*. 2014. No. 2, pp. 34–42.
7. Makarov A.N. Radiation from large gas volumes and heat exchange in steam boiler furnaces // *Power Technology and Engineering*. 2015. No. 3 (49), pp. 196–201.
8. Makarov A.N. Flare Temperature and nitrogen oxide emission reduction and heat transfer in the TGMP-314I steam boilerfirebox // *Power Technology and Engineering*. 2016. No. 2 (50), pp. 200–203.
9. Makarov A.N., Okuneva V.V., Galicheva M.K. Influence of the length of a torch tongue on heat flow in a burner device // *Power Technology and Engineering*. 2017. No. 4 (51), pp. 445–450.
10. Патент РФ 2613539. *Топка для сжигания газомазутного топлива* / Макаров А.Н., Галичева М.К., Кузнецов А.В. Заявл. 12.01.2016. Оpubл. 17.03.2017. Бюл. № 8.
11. Патент РФ 2547675. *Топка для сжигания газомазутного топлива* / Макаров А.Н., Неверов Ф.Н., Кузнецов А.В. Заявл. 14.04.2014; Оpubл. 10.04.2015. Бюл. № 10.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой 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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Основные положения открытых в России (в ТвГТУ) законов теплового излучения газовых объемов электрических дуг и факелов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 3 (15). С. 50–58.

THE MAIN PROVISIONS OF THE LAWS OF THERMAL RADIATION OF GAS VOLUMES OF ELECTRIC ARCS AND TORCHES DISCOVERED IN RUSSIA (IN TVSTU)

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The description of the fundamental laws of physics discovered by the author, the laws of thermal radiation of ionized and non-ionized gas volumes is given. On the basis of open laws, a modern theory of heat transfer and methods for calculating heat transfer in electric arc and flare metallurgical furnaces, furnaces of steam boilers, and combustion chambers of gas turbine plants of

power plants have been developed. The use of scientific discovery makes it possible to create innovative electric arc steel-making furnaces, flare heating furnaces, furnaces, combustion chambers in which the consumption of electricity and fuel is reduced, productivity and service life are increased, and the amount of harmful emissions into the environment is reduced.

Keywords: heat exchange, heat radiation, electric arc, torch, furnaces, furnaces, combustion chambers.

REFERENCES

1. Bloch A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkov A.N. *Teploobmen izlucheniym* [Heat transfer by radiation]. Moscow: Energoatomizdat. 1991. 432 p.
2. Siegel R., Howell J. *Teploobmen izlucheniym* [Heat transfer by radiation]. Moscow: Mir. 1975. 934 p.
3. Telegin A.S. *Teplotekhnicheskiye raschety metallurgicheskikh pechey* [Thermotechnical calculations of metallurgical furnaces]. Moscow: Metallurgy. 1993. 368 p.
4. Makarov A.N., Svenchansky A.D. *Optimal'nyye teplovyye rezhimy dugovykh staleplavil'nykh pechey* [Optimal thermal conditions of arc steel-smelting furnaces]. Moscow: Energoatomizdat. 1992. 96 p.
5. Makarov A.N. *Teploobmen v elektrodugovykh i fakel'nykh metallurgicheskikh pechakh i energeticheskikh ustanovkakh* [Heat transfer in electric arc and flare metallurgical furnaces and power plants]. St. Petersburg: Lan. 2014. 384 p.
6. Makarov A.N. The theory of radioactive heat exchange in fire box, fireboxes, combustion chambers is replenished by four new laws. *Science Discovery*. 2014. No. 2, pp. 34–42.
7. Makarov A.N. Radiation from large gas volumes and heat Exchange in steam boiler furnaces. *Power Technology and Engineering*. 2015. No. 3 (49), pp. 196–201.
8. Makarov A.N. Flare Temperature and nitrogen oxide emission reduction and heat transfer in the TGMP-314I steam boilerfirebox. *Power Technology and Engineering*. 2016. No. 2 (50), pp. 200–203.
9. Makarov A.N., Okuneva V.V., Galicheva M.K. Influence of the length of a torch tongue on heat flow in a burner device. *Power Technology and Engineering*. 2017. No. 4 (51), pp. 445–450.
10. Patent RF 2613539. *Topka dlya szhiganiya gazomazutnogo topliva* [Furnace for burning oil-gas fuel]. Makarov A.N., Galicheva M.K., Kuznetsov A.V. Declared 01.12.2016. Published 03.17.2017. Bulletin No. 8. (In Russian).
11. Patent RF 2547675. *Topka dlya szhiganiya gazomazutnogo topliva* [Furnace for combustion of oil-gas fuel]. Makarov A.N., Neverov F.N., Kuznetsov A.V. Declared 04.14.2014. Published 04.10.2015. Bulletin No. 10. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Power Supply and Electrical Equipment, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. The main provisions of the laws of thermal radiation of gas volumes of electric arcs and torches discovered in Russia (in TvSTU) // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2022. No. 32 (15), pp. 50–58.

УДК 621.3.08

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРОГНОЗА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ,
ИМЕЮЩЕГО СОБСТВЕННУЮ ГЕНЕРАЦИЮ****С.В. Маринова***Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Маринова С.В., 2022

Аннотация. Указаны традиционные способы экономии электроэнергии промышленными предприятиями. Описаны достоинства когерентных газопоршневых установок. Рассмотрена методика для повышения точности прогноза электропотребления промышленного предприятия, имеющего собственную генерацию.

Ключевые слова: прогнозирование электроэнергии, искусственные нейронные сети, газопоршневая установка, моделирование, нагрузка, электросеть.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-3-59-66

Сегодня имеется множество способов, которые промышленные потребители могут использовать, чтобы оптимизировать свое электропотребление и при этом получить экономическую выгоду.

Традиционным средством извлечения экономической выгоды из применения электроэнергии считается выбор оптимального тарифа путем выравнивания графика электропотребления предприятия, а в ряде случаев – через перенос работы производства из зоны пиковой нагрузки на часы, во время которых действуют дешевые тарифы, то есть уменьшение оплаты происходит благодаря расчетам по наиболее предпочтительной ставке на основе имеющихся статистических данных по электропотреблению. Во время анализа фактических почасовых расходов (мощностей) и суточного графика рабочего дня определяют самую недорогую из доступных систем ставок платы за электроэнергию.

При анализе графика нагрузки всегда используются данные по электропотреблению из архивов автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ).

Другим способом снижения затрат на энергоресурсы является применение когерентных газопоршневых установок (КГУ). В современных экономических условиях в энергетическом хозяйстве предприятия, помимо основного электротехнического и тепломеханического оборудования, должны иметься дополнительные аварийные и автономные установки для обеспечения организации не только электроэнергией, но и теплом.

Сегодня широко используют когенерационные электростанции малой и средней мощности на базе газопоршневых двигателей внутреннего сгорания. Проблема генерации собственной электрической и тепловой энергии особенно актуальна во время активного роста тарифов на эти ресурсы. Многим крупным и средним предприятиям стало выгоднее генерировать собственную электроэнергию из газа [1].

Когерентные газопоршневые установки не только вырабатывают электроэнергию, но и поставляют тепло. Благодаря комбинированной выработке электричества и тепла можно сэкономить, используя КГУ, до 50 % средств (по сравнению с отдельной выработкой электричества и тепла) [2]. Одним из главных преимуществ таких установок является короткий срок окупаемости, который составляет 2–3 года. Показатели качества электроэнергии, производимой КГУ, выше и стабильнее, чем у электроэнергии, получаемой от электросетей.

В современных условиях перед промышленными потребителями стоит задача получения прогнозных оценок графиков электрической нагрузки. Прогнозирование объемов электрической энергии нагрузки позволяет не только планировать эту нагрузку, но и оптимизировать затраты на энергоносители. Прогнозирование электропотребления предприятия выступает основой для принятия решений по энергоэффективности, в том числе и для организаций, использующих КГУ.

В области моделирования и прогнозирования электропотребления на промышленных предприятиях, применяющих для генерации электроэнергии установки собственной генерации, в том числе КГУ, имеется ряд особенностей, связанных с разработкой модели процесса электропотребления не только от электросетей, но и от установок собственной генерации. Точность прогнозирования связана с используемыми методами расчетов.

Статистические методы и методы искусственного интеллекта в настоящее время считаются наиболее перспективными в сфере проектирования электрической нагрузки. Описание модели на базе этих методов имеет ряд преимуществ: минимизируются затраты на решение задачи, высока точность прогноза. Искусственные нейронные сети (ИНС) эффективно применяются в условиях априорной информации и в законах моделируемого процесса [3].

Обязательные этапы любого исследования: статистический анализ данных, обработка больших массивов информации, расчеты и моделирование. Для обработки большого входного массива данных, в том числе получения отсутствующих сведений, систематизации, нахождения оптимального результата, требуется программный пакет статистического анализа, реализующий функции анализа, управления данными, визуализации данных с привлечением статистических методов и обладающий инструментом автоматического нейросетевого поиска. Программный пакет статистического анализа должен позволять конструировать собственные сети, а формат входных и выходных данных такого пакета – быть совместим с самыми распространенными форматами (например, с электронными таблицами), любым приложением, поддерживающим СОМ (Component Object Model).

Правильный подбор типа нейронной сети чаще всего зависит от условия задачи.

Для надежного прогнозирования электропотребления предприятия от электросетей необходимо выявить факторы-зависимости с расчетом коэффициента детерминации и выявлением высоких регрессионных связей между каждым из рассматриваемых факторов и электропотреблением.

Как правило, для прогноза электропотребления среди возможных зависимостей предполагаются метеофакторы: температура наружного воздуха, освещенность, влажность, скорость ветра, а также тип дня в неделе (рабочий/праздничный). По каждому из перечисленных факторов осуществляются сбор и статистический анализ зависимости выходной (целевой) функции от рассматриваемого фактора. При подготовке прогнозной

модели проверялась гипотеза о влиянии на расход электроэнергии предприятия температуры наружного воздуха. Положение о зависимости расхода электроэнергии от температуры является традиционным подходом в практике анализа режимов электропотребления энергосистемами России. Значимость такого влияния отмечена в [4].

Считается, что метеофакторы во многом определяют сезонные колебания и суточную неравномерность, а также нерегулярные отклонения графиков электропотребления. Влияние температуры обусловлено расходом электроэнергии на отопление зданий, вентиляцию, охлаждение в холодильниках, кондиционирование. Эта традиционная зависимость характерна для энергосистем, где в структуре потребления достаточно велика доля коммунально-бытовой, осветительной нагрузки (в данном случае колебания метеофакторов вызывают большие скачки электропотребления). Промышленное производство, особенно то, которое использует когенерацию для обеспечения себя не только электроэнергией, но и теплом, такой закономерности, как правило, не имеет. Между промышленной нагрузкой и температурой наружного воздуха прослеживается слабая связь.

При рассмотрении других факторов была установлена зависимость от планового значения производимой продукции, количества выработанной тепловой энергии, количества электроэнергии, произведенной КГУ, расхода условного топлива на КГУ, ретроспективных данных активной потребленной электроэнергии, коэффициента загрузки КГУ, коэффициента загрузки производственных мощностей.

Электропотребление предприятия от электросетей уменьшается в связи с параллельной выработкой электроэнергии собственной КГУ. Эта зависимость в рассматриваемой модели прогноза самая очевидная. Каждый фактор, влияющий на величину электропотребления, в модели будет иметь свой весовой коэффициент, отражающий степень влияния.

Для определения входных величин будущей нейронной сети проводился регрессионный анализ. Выявленные факторы, связь которых с потреблением электроэнергии от электросетей оказалась высока, в модели указанной сети будут использоваться в качестве входных сигналов. Модель имеет много входов (по количеству влияющих факторов) и один выход.

На данный момент не существует установленного, стандартизованного метода выбора архитектуры ИНС, близкой к оптимальной. Проект оптимальной архитектуры ИНС можно сформулировать как задачу поиска. Для выбора подходящей архитектуры нейронной сети обычно используются основные подходы: эвристика, каскад-корреляция, эволюционный алгоритм, автоматизированный [5].

Выбор наилучшей модели проходит в несколько этапов. Как правило, это эмпирический процесс по созданию нескольких структур, алгоритмов обучения, функций активаций, подбор различного числа нейронов во входном и скрытом слоях и других особенностей в построении ИНС. На практике выбирается тип ИНС с наименьшей ошибкой прогноза.

Для создания качественной модели необходимо выбрать оптимальную архитектуру (структуру) нейронной сети. Самые лучшие для формирования краткосрочных прогнозов нейронные сети – это сети с радиально-базисными функциями (RBF) и сети с многослойным персептоном (MLP). В эксперименте были использованы обе (и RBF, и MLP). Следует иметь в виду, что многослойный персептон может порождать возможность более сложных связей, но требует большего времени на обучение и оценку. Радиальная

базисная функция, по сравнению с MLP, затрачивает меньше времени на обучение и оценку, но при этом «мощность» предсказания будет ниже. Иными словами, и та и другая модель имеет как преимущества, так и недостатки; выявить их можно только эмпирическим способом, то есть построив как сети RBF, так и сети MLP. Поэтому целесообразно сформировать различные модели с помощью нескольких инструментов: автоматизированной нейронной сети и пользовательской нейронной сети, которые позволяют конструировать собственные сети и выбирать наиболее подходящее решение.

Варианты реализации ИНС с двумя выбранными архитектурами тестируются с разными числами нейронов в скрытом слое.

Чтобы обучить многослойный персептон, необходимо определить функции, которые он способен моделировать. В процессе моделирования ИНС многослойного персептона и сравнения полученных результатов была выбрана сигмоидная функция активации на скрытом и выходном слое «гиперболический тангенс». Поочередно также проверяется действие нескольких функций активации – тождественной, логистической, гиперболической. Тестируется различное количество обучаемых и сохраняемых сетей.

Полученная модель имеет много входов, соответствующих количеству ранее найденных влияющих факторов, и один выход. Влияющий фактор, выраженный определенным значением, подается на входе нейронной сети, а на выходе возникает сигнал, представляющий собой реакцию нейрона на данное воздействие, а именно прогноз электропотребления предприятия, кВт·ч, от электросетей.

На этапе сравнения различных вариантов и сочетаний используемых архитектур, функций активации, количества нейронов в скрытом слое, алгоритмов обучения выявляется вариант с наименьшей ошибкой между прогнозным и фактическим значением.

Согласно методу наименьших квадратов для обучения нейронных сетей, ошибка функционирования сети (здесь – абсолютная ошибка прогноза) определяется по выражению

$$\sum E_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - d_i)^2,$$

где y_i – выход сети (прогноз по электропотреблению предприятия от электросетей); d_i – фактическое значение электропотребления предприятия от электросетей; p – индекс образца в обучающей выборке [6].

Задача заключается в нахождении таких значений весовых коэффициентов в модели, при которых ошибка функционирования сети была бы минимальной:

$$\sum E_p \longrightarrow \min.$$

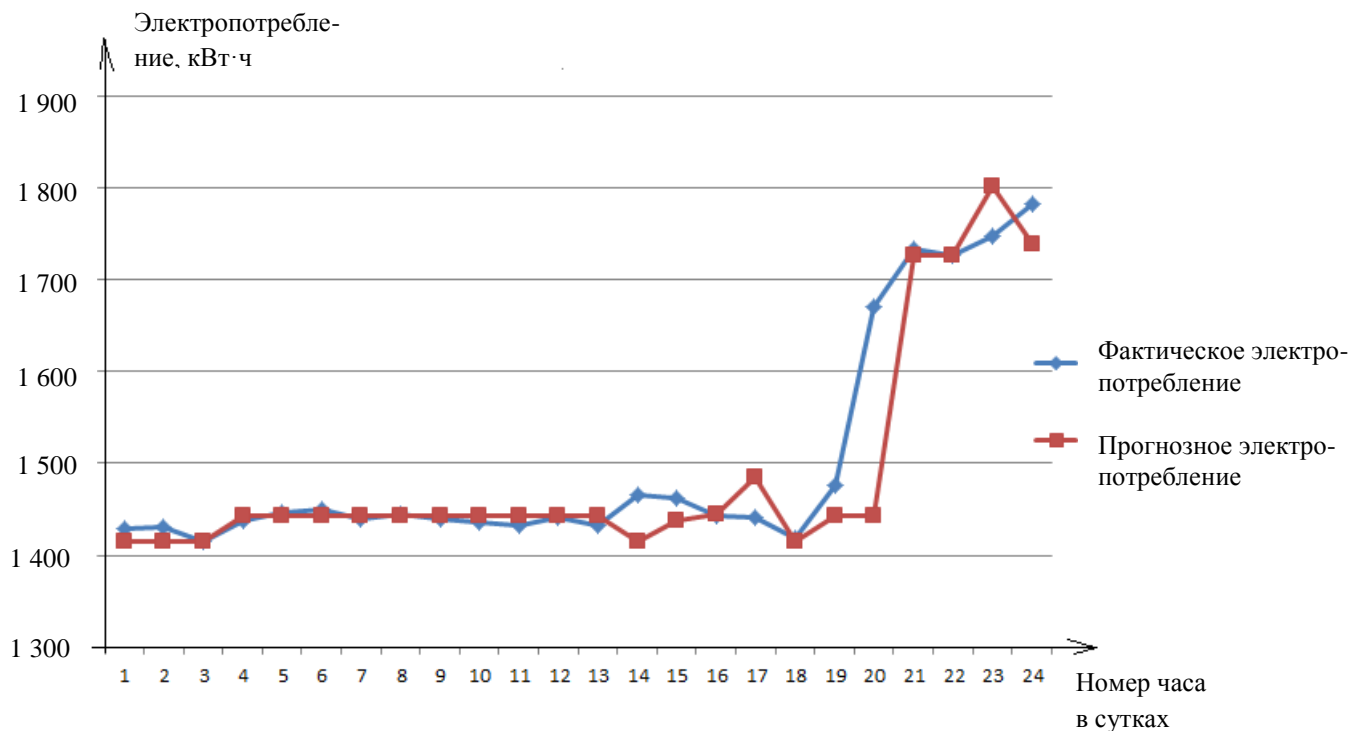
В пользовательской нейронной сети была выбрана нейронная сеть многослойного персептона MLP 6-7-1, где наименьшая ошибка прогноза $E = 0,5$ %. В таблице показаны фактические и прогнозные значения почасового расхода активной электроэнергии, потребляемой предприятием с КГУ от электросетей, абсолютная ошибка прогноза в виде разности этих значений (прогноза и факта).

Фактические и прогнозные почасовые значения
активной потребленной мощности, кВт

Номер часа в сутках	Фактическое электропотребление, кВт·ч	Прогнозируемое электропотребление, кВт·ч	Разность, кВт·ч
1	1 429,582	1 415,018	14,563 64
2	1 430,018	1 415,018	15,00
3	1 414,836	1 415,018	-0,181 82
4	1 437,164	1 443,891	-6,727 27
5	1 445,945	1 443,891	2,054 545
6	1 449,709	1 443,891	5,818 182
7	1 439,345	1 443,891	-4,545 45
8	1 444,527	1 443,891	0,636 364
9	1 438,745	1 443,891	-5,145 45
10	1 436,182	1 443,891	-7,709 09
11	1 431,982	1 443,891	-11,909 1
12	1 440,709	1 443,891	-3,181 82
13	1 432,800	1 443,886	-11,086 4
14	1 466,291	1 415,018	51,272 73
15	1 461,873	1 437,543	24,33
16	1 443,545	1 444,205	-0,659 09
17	1 440,873	1 485,369	-44,496 4
18	1 419,218	1 415,105	4,112 727
19	1 476,764	1 443,98	32,783 64
20	1 670,764	1 443,98	226,783 6
21	1 782,655	1 802,500	6,887 273
22	1 727,291	1 726,895	0,396 364
23	1 748,127	1 802,500	-54,372 7
24	1 782,655	1 738,415	44,24

Графики почасового фактического и прогнозного электропотребления представлены на рисунке.

Тестирование построенной сети и сравнение результатов выявили высокую точность прогнозирования. Представленный вариант ИНС обладает наиболее оптимальной нейронной сетью, то есть сетью с наименьшей ошибкой прогноза. Полученная прогнозная модель может быть сохранена и в дальнейшем использована промышленными предприятиями с когерентными установками на других массивах входных данных в качестве инструмента сокращения затрат на энергоресурсы.



Графики почасового фактического и прогнозного электропотребления, полученного в модели с наименьшей ошибкой функционирования сети

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черемных Д.Н., Ташлыкова Е.В., Разепина М.Г. Газопоршневые установки как альтернативный способ генерации электроэнергии // *Молодой ученый*. 2014. № 21 (80). С. 245–247.
2. Длугосельский В.И., Земцов А.С. Эффективность использования в теплофикации газотурбинных и парогазовых технологий // *Теплоэнергетика*. 2000. № 12. С. 3–6.
3. Ярыгина Е.А. Разработка методики краткосрочного прогнозирования электропотребления системы собственных нужд ТЭЦ. Дисс... канд. техн. наук. Самара. 2021. 125 с.
4. Макоклюев Б.И., Антонов А.В., Полижаров А.С., Тупицин И.В., Гилева С.С. Влияние метеофакторов на режимы потребления электроэнергии энергосистем // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Сборник трудов Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко*. Иркутск: Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. 2015. С. 405–414.
5. Кассем С.А., Ибрагим А.Х.А., Хасан А.М., Логачева А.Г. Прогнозирование электропотребления предприятия с применением искусственных нейронных сетей // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2021. Т. 7. № 1 (25). С. 177–193.
6. Ведерников А.М., Ярыгина Е.А. Разработка программы для решения задач краткосрочного прогнозирования электропотребления на основе искусственных нейронных сетей // *Энергетик*. 2019. № 2. С. 32–35.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАРИНОВА Светлана Васильевна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sv.marinova@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Маринова С.В. Повышение точности прогноза электропотребления промышленного предприятия, имеющего собственную генерацию // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 3 (15). С. 59–66.

**IMPROVING THE ACCURACY OF POWER CONSUMPTION FORECAST
OF INDUSTRIAL ENTERPRISE WITH ITS OWN GENERATION**

S.V. Marinova

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The traditional ways of saving electricity by industrial enterprises are indicated. The advantages of coherent gas piston installations are described. The technique for increasing the accuracy of the forecast of power consumption of an industrial enterprise with its own generation is considered.

Keywords: electricity forecasting, artificial neural networks, gas piston installation, simulation, load, power grid.

REFERENCES

1. Cheremnyh D.N., Tashlykova E.V., Razepina M.G. Gas piston units as alternative way to generate electricity. *Molodoj uchenyj*. 2014. No. 21 (80), pp. 245–247. (In Russian).
2. Dlugoselskiy V.I., Zemtsov A.S. Efficiency of use in district heating gas turbine and combined cycle technologies. *Teploenergetika*. 2000. No.12, pp. 3–6. (In Russian).
3. Yarygina E.A. Development of short-term forecasting methodology of power consumption CHP auxiliary system. Cand. Diss. (Engineering). Samara. 2021. 128 p. (In Russian).
4. Makokluev B.I., Antonov A.V., Polidzarov A.S., Tupicin I.V., Gileva S.S. Influence of meteorological factors on model electricity consumption of power systems. *Research methodology reliability of large energy systems: Collection of works of the International Scientific Seminar named after Yu.N. Rudenko*. Irkutsk: Institute of Energy Systems named L.A. Melentiev of SB RAS. 2015, pp. 405–414. (In Russian).
5. Kassem S.A., Ibragim A.H.A., Hasan A.M., Logacheva A.G. Forecasting the power consumption of an enterprise using artificial neural networks. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoye modelirovaniye. Neft', gaz, energetika*. 2021. Vol. 7. No. 1 (25), pp. 177–193. (In Russian).
6. Vedernikov A.M., Yarygina E.A. Development of the program to meet the challenges of short-term forecasting of electricity consumption using artificial neural networks. *Energetik*. 2019. No. 2, pp. 32–35. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

MARINOVA Svetlana Vasilevna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Equipment, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sv.marinova@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Marinova S.V. Improving the accuracy of power consumption forecast of industrial enterprise with its own generation // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 3(15), pp. 59–66.

УДК 629.7.052

О ПОНЯТИИ n -СИММЕТРИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ТЕЛА

Ал.А. Шум¹, А.М. Ветошкин², Ан.А. Шум¹

¹ *Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

² *Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана
(г. Мытищи, Московская область)*

© Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А., 2022

Аннотация. В статье на случай пространства переносено общее понятие n -симметрии. Рассмотрены вопросы n -симметрии пространственного тела. Введено понятие центра n -симметрии тела.

Ключевые слова: симметрия, c -симметрия, s -симметрия, n -симметрия, центр симметрии, центр n -симметрии, функция трех переменных, функция плотности, тело, масса, центр масс.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-3-66-72

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент имеется большой выбор технологий для механической и физико-технической обработки деталей машин (о богатстве этого выбора можно составить представление по названиям [1–13]). При этом выбор той или иной технологии в каждом отдельном случае определенным образом зависит от характера распределения массы внутри обрабатываемой детали. Поэтому представляет интерес изучение свойств указанного распределения, в том числе и тех, которые обусловлены тем или иным видом симметрии. С этой точки зрения в работах [14–20, 25–27] изучались плоские детали, называемые пластинами [16], а в статьях [21–24] рассматривались объемные детали, то есть тела в пространстве. Настоящая статья продолжает эти исследования для случая пространства: она посвящена вопросам симметрии объемных деталей. В работах [26, 27] рассматривались понятия n -симметрии и центра n -симметрии для плоской пластины. В рамках этой статьи эти понятия переносятся на случай пространства и обсуждаются применительно к объемному телу произвольной формы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ

Описывается трехмерное евклидово пространство с заданной прямоугольной декартовой системой координат. Под *областью* понимается замкнутая область этого пространства, ограниченная некоторой поверхностью (которая также считается частью области). Область V_1 называется *подобластью* области V , если $V_1 \subseteq V$.

Область V вместе с определенной в этой области непрерывной неотрицательной функцией трех переменных $f(x, y, z)$ называется *телом* D , при этом функция $f(x, y, z)$ является *плотностью* тела D . Подобласть области V вместе с соответствующим ограничением функции плотности $f(x, y, z)$ называется *подтелом* тела D . *Массой* тела D (в соответствии с традиционным определением из [28]) именуется

$$m(D) = \iiint_V f(x, y, z) dx dy dz .$$

Несмотря на то, что функция плотности $f(x, y, z)$ в некоторых точках области V может быть равной нулю, для любого тела D предполагается выполненным обязательное дополнительное условие: масса самого тела D и масса всякого его подтела должны быть больше нуля.

Частью области V называется одна или несколько ее подобластей, *частью тела* D – одно или несколько его подтел. Если часть G тела D состоит из нескольких подтел, то ее масса $m(G)$ считается равной сумме масс этих подтел.

Плоскость называем *плоскостью n -симметрии* тела D , если она делит область V тела D на две части V_1 и V_2 так, что

$$\iiint_{V_1} (r(x, y, z))^n f(x, y, z) dx dy dz = \iiint_{V_2} (r(x, y, z))^n f(x, y, z) dx dy dz ,$$

где $r(x, y, z)$ – расстояние от точки (x, y, z) до данной плоскости.

Если выбранная плоскость оказалась плоскостью n -симметрии рассматриваемого тела, то можно говорить, что данное тело является *n -симметричным* относительно этой плоскости. Отметим, что в случае с терминами, использующими n -симметрию, в отличие от терминов, связанных с c -симметрией и s -симметрией, префикс n представляет собой не просто букву (как c или s), но целое неотрицательное число. Таким образом, общее понятие n -симметрии распадается на множество отдельных понятий: 0-симметрия, 1-симметрия, 2-симметрия и т. д. Легко заметить, что плоскость 0-симметрии представляет собой плоскость полумасс, в то время как плоскость 1-симметрии – плоскость равновесия (в соответствии с определениями из [16]). Следующая лемма является обобщением лемм 1 и 2 из статьи [23].

Лемма. *Существует единственная плоскость n -симметрии тела D , параллельная данной плоскости.*

Доказательство. Пусть плоскость Π проведена параллельно некоторой изначально заданной плоскости Π_0 и делит область V на две части – V_1 и V_2 . Будем перемещать плоскость Π , оставляя параллельной самой себе (а значит, и плоскости Π_0), в перпендикулярном ей (а значит, и плоскости Π_0) направлении так, чтобы часть V_1 возрастала, а часть V_2 уменьшалась. При этом разность интегралов

$\iiint_{V_1} (r(x, y, z))^n f(x, y, z) dx dy dz - \iiint_{V_2} (r(x, y, z))^n f(x, y, z) dx dy dz$ будет строго возрастать, так

как первый из этих интегралов будет увеличиваться (поскольку будет увеличиваться часть V_1), а второй – уменьшаться (поскольку будет сокращаться часть V_2). Легко видеть, что при одном крайнем положении (когда часть V_1 очень мала) значение этой разности будет меньше нуля, а при другом (когда часть V_2 очень мала) – больше нуля. Из соображений непрерывности очевидным образом вытекает, что найдется единственное промежуточное положение плоскости Π , такое, при котором рассматриваемая разность будет равна нулю. Это положение плоскости Π и определит единственную плоскость n -симметрии тела D , параллельную изначально заданной плоскости Π_0 .

Говорим, что *плоскости пересекаются в одной точке*, если имеется точка, принадлежащая всем этим плоскостям, и притом такая точка является единственной.

В соответствии с определениями из работы [23] центр полумасс тела D представляет собой точку, в которой пересекаются все плоскости полумасс этого тела (то есть все его плоскости 0-симметрии), а центр масс тела D – точку, в которой пересекаются все его плоскости равновесия (то есть все его плоскости 0-симметрии). Обобщая эти определения, естественно привести понятие *центра n -симметрии* тела D . Оно звучит следующим образом: *если все плоскости n -симметрии тела D пересекаются в одной точке, то эта точка является центром n -симметрии тела D .*

Таким образом, центр 0-симметрии тела D представляет собой центр полумасс этого тела, а центр 1-симметрии – его центр масс. В статье [23] отмечено, что центр 0-симметрии (центр масс) тела D всегда существует, в то время как его центр 1-симметрии (центр полумасс) может не существовать. Таким образом, в общем случае центр n -симметрии тела D есть не всегда.

Тело D , согласно определению, представляет собой пространственную область V вместе с определенной в этой области функцией плотности $f(x, y, z)$. Таким образом, n -симметрию тела D можно трактовать как n -симметрию функции трех переменных $f(x, y, z)$ в области V (подобная трактовка преобладает в работах [21–24]).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Понятие центра n -симметрии тела D является обобщением известных понятий центра масс и центра полумасс. Введение общего понятия позволяет рассматривать известные ранее термины с единой точки зрения, что приводит к упрощению формулировок и сокращению доказательств. Следует отметить, что естественное требование $f(x, y, z) \geq 0$, накладываемое на функцию плотности, и условие строгой положительности массы любого подтела тела D существенно важны для доказательства рассмотренной в статье леммы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожжалова В.И., Седыхин Ф.В., Смоленцев В.П., Ямпольский В.М. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учебное пособие. В 2 т. М.: Высшая школа. 1983. Т. 1. 247 с. Т. 2. 208 с.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение. 1993. 336 с.
3. Вороничев Н.М., Тартаковский Ж.Э., Генин В.Б. Автоматические линии из агрегатных станков. М.: Машиностроение. 1979. 487 с.

4. Дальский А.М., Гаврилюк В.С. Механическая обработка материалов: учебник для вузов. М.: Машиностроение. 1981. 266 с.
5. Немилов Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов. Л.: Машиностроение. 1983. 160 с.
6. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение. 1977. 303 с.
7. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение. 1979. 152 с.
8. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение. 1989. 297 с.
9. Трент Е.М. Резание металлов. М.: Машиностроение. 1980. 263 с.
10. Участки для электроэрозионной обработки рабочих деталей вырубных штампов и пресс-форм: методические рекомендации по проектированию. М.: ОНТИ ЭНИМС. 1983. 47 с.
11. Этин А.О. Кинематический анализ и выбор эффективных методов обработки лезвийным инструментом. М.: Машгиз. 1953. 173 с.
12. Янюшкин А.С., Шоркин В.С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании. М.: Машиностроение-1. 2004. 230 с.
13. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Минск: Новое знание. 2006. 512 с.
14. Шум Ал.А. О симметрии функций, определенных в круге // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2014. Вып. 25. С. 3–8.
15. Шум Ал.А. Замечание об s -симметричных функциях // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2015. Вып. 27. С. 3–6.
16. Шум Ал.А. О центрах симметрии функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2016. Вып. 30. С. 19–23.
17. Шум Ал.А. О центрах симметрии функции, определенной в выпуклой области плоскости // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Вып. 31. С. 19–22.
18. Шум Ал.А. Симметрическая линия функции двух переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. Вып. 32. С. 103–105.
19. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Симметрическая линия правильного однородного треугольника // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 34. С. 47–53.
20. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Параметрические уравнения симметрической линии правильного однородного треугольника // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2018. Вып. 34. С. 44–47.
21. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Замечание о симметрии функций, определенных в шаре // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 3 (3). С. 38–46.
22. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Об одном критерии s -симметрии функции трех переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2019. № 4 (4). С. 30–35.
23. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии функции трех переменных // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 1 (5). С. 71–78.
24. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии функции, определенной в выпуклой области пространства // *Вестник Тверского государственного технического*

университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 2 (6). С. 57–65.

25. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Замечание о центрах s -симметрии и c -симметрии плоской пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 63–70.

26. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. Моменты плоской пластины относительно прямой и некоторые вопросы симметрии // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 2 (10). С. 78–84.

27. Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О центрах симметрии плоской выпуклой пластины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 3 (11). С. 65–72.

28. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике (полный курс). М.: АЙРИС ПРЕСС. 2007. 604 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШУМ Александр Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: shum@tstu.tver.ru

ВЕТОШКИН Александр Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики, информатики и вычислительной техники, Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, 141005, Россия, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1, Россия. E-mail: vetkin@mgul.ac.ru

ШУМ Анатолий Александрович – магистрант факультета информационных технологий, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А. О понятии n -симметрии пространственного тела // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 66–72.

ON THE CONCEPT OF N -SYMMETRY OF A SPATIAL BODY

Al.A. Shum¹, A.M. Vetoshkin², An.A. Shum¹

¹*Tver State Technical University (Tver)*

²*Mytishchi filial of MSTU named after N. Uh. Bauman (Mytishchi, Moscow region)*

Abstract. In the article the general concept of n -symmetry is transferred to the case of space. The issues of n -symmetry of a spatial body are considered. The concept of the center of n -symmetry of the body is introduced.

Keywords: symmetry, c -symmetry, s -symmetry, n -symmetry, center of symmetry, center of n -symmetry, function of three variables, density function, body, mass, center of mass.

REFERENCES

1. Artamonov B.A., Volkov Yu.S., Drozhzhlova V.I., Sedykhin F.V., Smolentsev V.P., Yampolsky V.M. *Elektrofizicheskie i elektrohimicheskie metody obrabotki materialov: uchebnoye posobiye* [Electrophysical and electrochemical methods of processing materials: manual]. In 2 vol. Moscow: Vysshaya shkola. 1983. Vol. 1. 247 p. Vol. 2. 208 p.
2. Vereschaka A.S. *Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta s iznosostojkimi pokrytiami* [The performance of the cutting tool with wear-resistant coatings]. Moscow: Mashinostroenie. 1993. 336 p.
3. Voronichev N.M., Tartakovskiy J.E., Genin V.B. *Avtomaticheskie linii iz agregatnykh stankov* [Automatic lines of modular machines]. Moscow: Mashinostroenie. 1979. 487 p.
4. Dalskiy A.M., Gavrilyuk V.S. *Mekhanicheskaya obrabotka materialov* [Mechanical treatment of materials: college textbook]. Moscow: Mechanical Engineering. 1981. 266 p. (In Russian).
5. Nemilov E.F. *Elektroerozionnaya obrabotka materialov* [Electroerosion treatment of materials]. L.: Mashinostroenie. 1983. 160 p.
6. Poduraev V.N. *Avtomaticheski reguliruemye i kombinirovannye processy rezaniya* [Automatically adjustable and combined cutting processes]. Moscow: Mashinostroenie. 1977. 303 p.
7. Silin S.S. *Metod podobiya pri rezanii materialov* [Method of similarity when cutting materials]. Moscow: Mashinostroenie. 1979. 152 p.
8. Starkov V.K. *Obrabotka rezaniem. Upravlenie stabil'nost'yu i kachestvom v avtomatizirovannom proizvodstve* [Cutting processing. Stability and quality management in automated production]. Moscow: Mashinostroenie. 1989. 297 p.
9. Trent E.M. *Rezanie metallov* [Metal cutting]. Moscow: Mashinostroenie. 1980. 263 p.
10. *Uchastki dlya elektroerozionnoy obrabotki rabochnykh detalej vyrubnykh shtampov i press-form: metodicheskkiye rekomendatsii po proyektirovaniyu* [Areas for electrical discharge machining of working parts of cutting dies and molds: design guidelines]. Moscow: ONTI ENIMS. 1983. 47 p.
11. Etn A.O. *Kinematicheskij analiz i vybor effektivnykh metodov obrabotki lezviynym instrumentom* [Kinematic analysis and selection of effective methods of processing with a climbing tool]. Moscow: Mashgiz. 1953. 173 p.
12. Yanushkin A.S., Shorkin V.S. *Kontaktnye processy pri elektroalmaznom shlifovanii* [Contact processes in electro-diamond grinding]. Moscow: Mashinostroenie-1. 2004. 230 p.
13. Yastcheritsyn P.I., Feldshtein E.E., Korniewicz M.A. *Teoriya rezaniya* [Theory of cutting]. Minsk: Novoe znanie. 2006. 512 p.
14. Shum A.I.A. On the symmetry of the functions defined in the circle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2014. Vol. 25, pp. 3–8. (In Russian).
15. Shum A.I.A. The comment about s -symmetric functions. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2015. Vol. 27, pp. 3–6. (In Russian).
16. Shum A.I.A. About the centers of symmetry of a function of two variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2016. Vol. 30, pp. 19–23. (In Russian).
17. Shum A.I.A. About the centers of symmetry of a function defined in a convex domain of the plane. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2017. Vol. 31, pp. 19–22. (In Russian).
18. Shum A.I.A. Symmetric line of a function of two variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2017. Vol. 32, pp. 103–105. (In Russian).
19. Shum A.I.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. The symmetric line of a regular homogeneous triangle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2018. Vol. 34, pp. 47–53. (In Russian).

20. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. Parametric equations of the symmetric line of a regular homogeneous triangle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2018. Vol. 34, pp. 44–47. (In Russian).
21. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. A note on the symmetry of functions defined in a ball. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Tehniceskije nauki»*. 2019. No. 3 (3), pp. 38–46. (In Russian).
22. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. On one criterion of s -symmetry of a function of three variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Tehniceskije nauki»*. 2019. No. 4 (4), pp. 30–35. (In Russian).
23. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. About the centers of symmetry of a function of three variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika I himicheskie tehnologii»*. 2020. No. 1 (5), pp. 71–78. (In Russian).
24. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. About the centers of symmetry of the function, defined in a convex area of space. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himicheskie tehnologii»*. 2020. No. 2 (6), pp. 57–65. (In Russian).
25. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. A note on the centers of s -symmetry and c -symmetry of a flat plate. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himicheskie tehnologii»*. 2021. No. 1 (9), pp. 63–70. (In Russian).
26. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. Moments of a flat plate relative to a straight line and some questions of symmetry. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himicheskie tehnologii»*. 2021. No. 2 (10), pp. 78–84. (In Russian).
27. Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. On the centers of symmetry of a flat convex plate. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta. Series «Construction. Electrical engineering and chemical technologies»*. 2021. No. 3 (11), pp. 65–72. (In Russian).
28. Pismennyi D.T. *Konspekt lektsiy po vysshey matematike (polnyy kurs) [Lecture notes on higher mathematics (full course)]*. Moscow: AIRIS PRESS. 2007. 604 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

SHUM Alexander Anatolievich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: shum@tstu.tver.ru

VETOSHKIN Alexander Mikhailovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics, Informatics and Computer Engineering, State Technical University named after N.E. Bauman, 1, 1st Institutskaya street, Mytishchi city, 141005, Russia. E-mail: vetkin@mgul.ac.ru

SHUM Anatolij Alexandrovich – Master's Student of the Faculty of Information Technologies, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

CITATION FOR AN ARTICLE

Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. On the concept of n -symmetry of a spatial body // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2022. No. 3 (15), pp. 66–72.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 66.074.371

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ГИДРАТАЦИИ MgO НА СВОЙСТВА Zn-Mg ПОГЛОТИТЕЛЯ СЕРОВОДОРОДА

*К.А. Верес, В.В. Усов, А.А. Ильин, С.П. Кочетков**Ивановский государственный химико-технологический университет (г. Иваново)*

© Верес К.А., Усов В.В., Ильин А.А., Кочетков С.П., 2022

Аннотация. Изучены физические и сорбционные характеристики поглотителя сероводорода на основе оксида цинка. Указано, что в качестве промотирующей добавки в работе был использован оксид магния разной степени гидратированности. Приведены результаты исследования с помощью рентгенофазового анализа процесса гидратации MgO в воде. Установлено, что при увеличении времени гидратирования добавки оксида магния с 10 до 40 мин температура максимальной сероемкости образца возрастает на 100 °С.

Ключевые слова: цинковый поглотитель, оксид магния, сероемкость.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-3-73-83

ВВЕДЕНИЕ

Сернистые соединения для большинства промышленных катализаторов являются сильнодействующими ядами. В производстве аммиака наиболее чувствительны к действию ядов катализаторы риформинга природного газа и низкотемпературной конверсии монооксида углерода. Сернистые соединения вызывают также коррозию аппаратуры, поэтому сероочистка обычно предшествует всем технологическим стадиям.

Очистка газов от соединений серы приносит экономическую выгоду: возникает регенерированная сера. Ежегодно на мировой рынок поступает более 50 млн т серы, извлекаемой по способу Клауса из отходящих газов предприятий газо- и нефтепереработки [1, 2].

Очистка природного газа проводится в два этапа. На первой стадии происходит гидрирование сераорганических соединений в сероводород, который затем поглощается сорбентами на основе оксида цинка. Ведущими производителями цинковых поглотителей являются такие компании, как HaldorTopsoe, JohnsonMatthey, Sud-Chemie. Среди отечественных производителей лидирующие позиции занимает ООО «НИАП-КАТАЛИЗАТОР» – практически монополист в отечественном производстве катализаторов сероочистки для предприятий, получающих синтез-газ из природного газа. Компания выпускает несколько типов поглотителей для разных условий эксплуатации и требований потребителей. Цинковые поглотители НИАП-02-02 (таблетки) и НИАП-02-05 (экструдаты) рассчитаны на диапазон температур 300–390 °С; цинк-медные поглотители НИАП-02-03

(экструдаты) и НИАП-02-04 (таблетки) могут использоваться для низкотемпературной очистки (интервал температур – 150–350 °С) [3].

Для повышения механической прочности и сорбционной емкости хемосорбенты на основе оксида цинка подвергают промотированию металлами и оксидами, а также поверхностно-активными веществами (ПАВ). Так, в работе [4] в качестве добавок использовались катионные фосфоросодержащие ПАВ.

В работе [5] исследовались характеристики устойчивости сорбентов на основе оксида цинка в среде компонентов синтез-газа с целью их количественного описания и учета в расчетах системы сероочистки.

При получении катализаторов и сорбентов с развитой геометрической поверхностью решающее значение приобретает стадия формования [6]. В технологии катализаторов и сорбентов наиболее распространены два способа формования: полусухое (прессование, таблетирование) и пластическое (экструзия) [7].

Экструзия (как более производительный способ формования) дает возможность получать изделия самой разнообразной формы. Более того, отличительная черта экструдеров – относительно простой переход от одного типа-размера к другому. Наиболее значимым преимуществом экструдированных контактных масс перед таблетированными выступает оптимальная пористая структура. Так, таблетированные гранулы имеют преимущественно монодисперсную структуру с эффективным радиусом пор 10–25 нм. Катализаторы и сорбенты, полученные экструзией, наряду с указанными, обладают широкими транспортными порами с диаметром 300–600 нм. Подобная пористая структура позволяет не только увеличить пористость, но и повысить степень использования зерна [8].

Целью данной работы является изучение влияния степени гидратации на механическую прочность и сорбционную емкость поглотителя сероводорода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовались следующие реактивы: оксид цинка квалификации «Ч» ZnO (ГОСТ 10262-73); оксид магния квалификации «Ч» MgO (ГОСТ 4526-75); спирт поливиниловый квалификации «ХЧ» (ГОСТ 10779-78).

Высокодисперсный оксид цинка получен по аммиачно-карбонатной технологии из технического ZnO по методике, описанной в работе [9].

Образцы серопоглотителя были приготовлены методом механического смешения оксидов цинка и магния (содержание MgO – 5 % от массы ZnO) с добавлением 4 % раствора поливинилового спирта (ПВС) для достижения оптимальной формовочной влажности. Полученную массу формовали в гранулы и просушивали на воздухе.

Образцы системы MgO-H₂O(ПВС) после гидратации просушивались при $t = 100$ °С в течение 2 ч, а затем исследовались на дериватографе Q-1500, что позволило провести разложение системы при постоянной температуре [10].

Рентгенофазовый анализ осуществлялся на дифрактометре ДРОН-3М с использованием $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ -излучения. Идентификация кристаллических фаз на дифрактограммах проводилась путем сравнения вычисленных межплоскостных расстояний с данными в базе ASTM.

Показатель сероемкости поглотителей определяли по поглощению H₂S статическим методом. Поглотитель фракции 0,5–0,25 мм помещали в реактор, находящийся в электропечи с регулируемой температурой. Осернение цинковых поглотителей проводили

в течение 10–12 ч при температуре 100–400 °С. После окончания осернения хемосорбент дробили, отбирали среднюю пробу, которую разлагали с помощью H_2SO_4 , а образовавшийся H_2S определяли иодометрически. Сероемкость a , %, рассчитывали по формуле

$$a = \frac{A \cdot 100}{g},$$

где A – количество серы во всей осерненной массе, г; g – исходная навеска хемосорбента, г.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе [1] исследовано совместное влияние ПАВ и механической обработки на массу оксида цинка перед формованием. Исследования показали, что паста ZnO , приготовленная в лопастном смесителе без ПАВ при небольших скоростях деформации, характеризуется преобладанием быстрых эластических деформаций и имеет плохие реологические свойства (относится к III структурно-механическому типу). После механической обработки этой массы в бисерной мельнице или диспергаторе с импеллером в присутствии ПАВ, величина быстрых эластических деформаций уменьшилась с 60 до 33 %, а медленных пластических и эластических возросла с 13 до 23 % и с 26 до 46 % соответственно, вследствие чего структурно-механические характеристики улучшились. Эти изменения обусловлены увеличением толщины прослойки между частицами, а также уменьшением их размера.

Структурно-механические свойства паст катализаторов и сорбентов можно изменять в широких пределах смешением материалов с различными свойствами. Для этого в ходе структурно-механического анализа выясняют степень развития того или иного вида деформации. Если возникает необходимость перевести имеющийся материал в иной структурно-механический тип, то осуществляют это добавкой к основному материалу другого, способного компенсировать недостаточное или избыточное развитие того или иного вида деформации. Так, регулирование реологических свойств системы $\text{ZnO-H}_2\text{O}$ возможно за счет введения добавок порошков оксидов металлов, имеющих больший размер агрегатов, чем у ZnO . Для этих целей можно использовать оксиды Al , Ca , Mg , Zn .

Концентрация воды в системе, толщина гидратных оболочек и соотношение между количеством свободной и связанной воды в значительной степени определяют реологические и другие свойства системы.

Процесс гидратации оксида магния проводился не только в воде, но и в 4%-м водном растворе ПВС как при механическом перемешивании, так и при диспергировании. Температуры во время опыта поддерживались 25 и 60 °С, соотношение твердой и жидкой фаз – 1:10. Твердая фаза после опыта отделялась от раствора, промывалась спиртом и сушилась до постоянного веса при $t = 110$ °С. Установлено, что при перемешивании наибольшая степень гидратации MgO достигается через 2 ч при температуре опыта 60 °С (рис. 1).

Использование в качестве дисперсионной среды 4%-го водного раствора ПВС незначительно снижает скорость гидратации MgO . Так, после 2 ч перемешивания в воде при температуре 60 °С степень гидратации MgO стала равна 92,5 %, а при этих же условиях в ПВС – 90,4 %. С уменьшением температуры степень гидратации снижается. При диспергировании скорость гидратации резко возрастает как в случае использования в качестве дисперсионной среды воды, так и ПВС. Уже после 5 мин диспергирования в воде

при 60 °С степень гидратации MgO достигла 96,1 %. При этих же условиях в ПВС степень гидратации составляла 91,5 % (рис. 2).

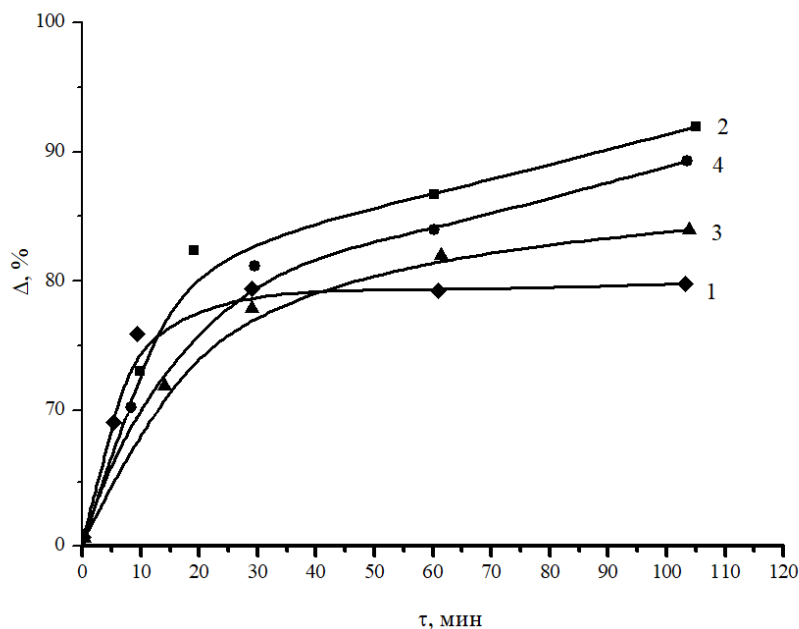


Рис. 1. Изменение степени гидратации оксида магния в воде и ПВС при перемешивании в зависимости от процесса и его температуры: 1 – гидратация в воде, температура 25 °С; 2 – гидратация в воде, температура 60 °С; 3 – гидратация в 4%-м растворе ПВС, температура 25 °С; 4 – гидратация в 4%-м растворе ПВС, температура 60 °С

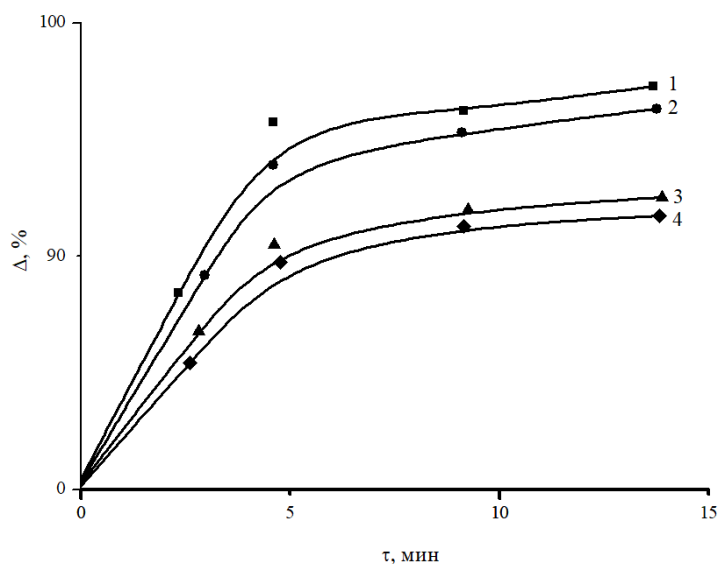


Рис. 2. Изменение степени гидратации оксида магния в воде и ПВС при диспергировании в зависимости от температуры процесса: 1 – гидратация в воде, температура 25 °С; 2 – гидратация в воде, температура 60 °С; 3, 4 – гидратация в 4%-м растворе ПВС, температура 25 °С; 4 – гидратация в 4%-м растворе ПВС, температура 60 °С

На рентгенограмме исходного оксида магния имеются три характерных рефлекса MgO (рис. 3). На рис. 3 цифры 1 и 2 обозначают индексированные фазы конкретных элементов. На рентгенограмме гидроксида магния появляется уже пять характерных линий. Полученный гидроксид магния относится к гексагональной сингонии.

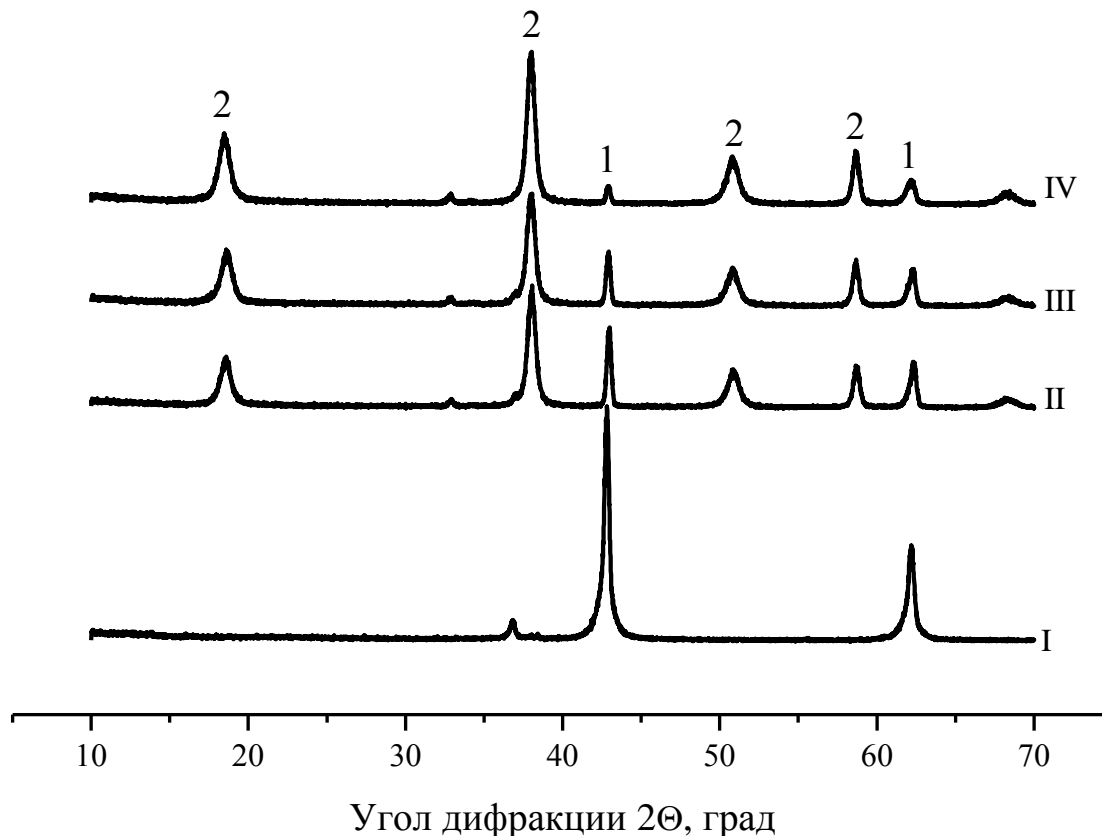


Рис. 3. Рентгенограммы исходного (I) и гидратированного в течение 10 (II) 30 (III), 60 мин (IV) оксида магния: 1 – MgO; 2 – Mg(OH)₂

На дериватограмме образца MgO-H₂O (рис. 4а) имеются два эндотермических эффекта: при температурах 102 и 402 °С. Первый связан с удалением адсорбционной влаги, второй – с разложением Mg(OH)₂ до MgO. Аналогичные эффекты наблюдаются и у системы, полученной диспергированием MgO в воде при температуре 60 °С в течение 15 мин (рис. 4б). Несколько отличается дериватограмма, полученная при использовании в качестве дисперсионной среды ПВС (рис. 4в). Во-первых, на ней наблюдается эндотермический эффект с максимумом при температуре 185 °С, вызванный, очевидно, термическим разложением ПВС. Во-вторых, максимум термического разложения Mg(OH)₂ приходится на температуру 382 °С, то есть несколько ниже, чем в случае использования в качестве дисперсионной среды чистой воды.

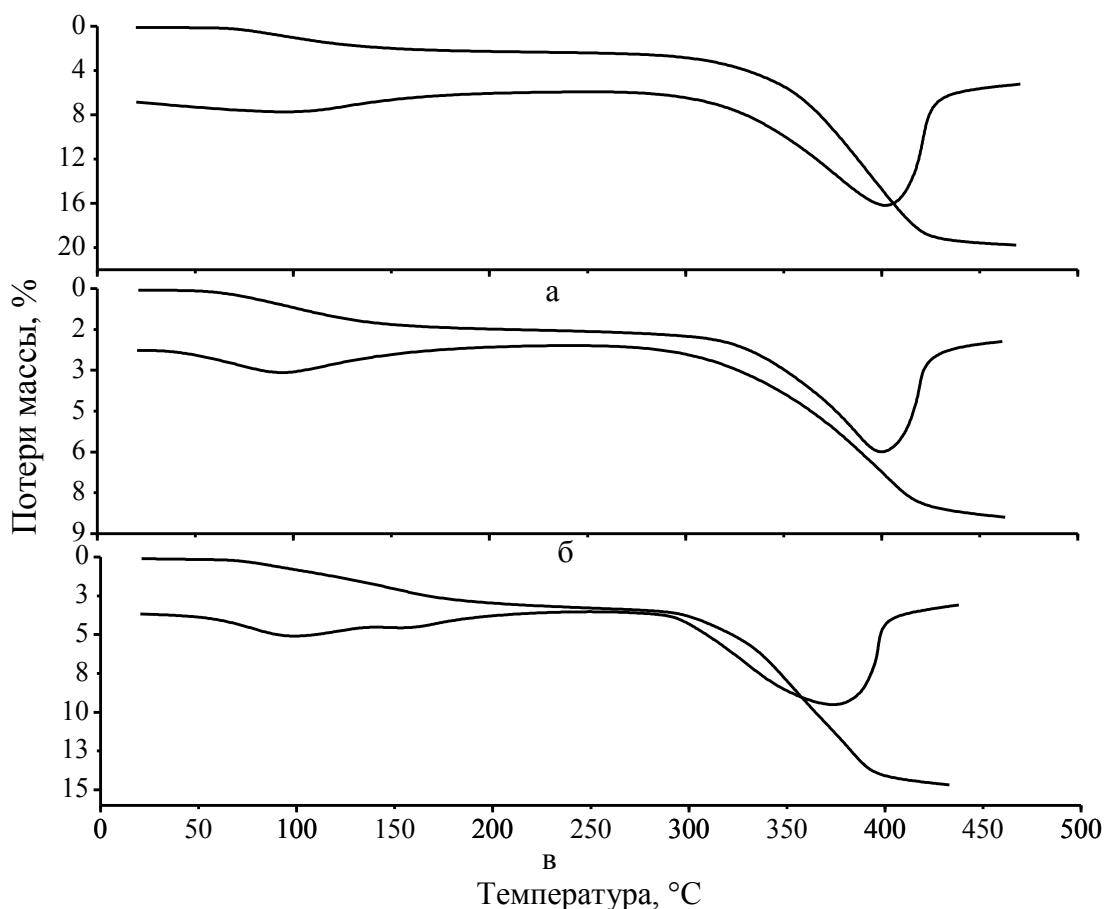


Рис. 4. Дериватограммы образцов: а – MgO-H₂O, 60 °C, 120 мин;
б – MgO-H₂O, 60 °C, 15 мин; в – MgO-ПВС, 25 °C, 120 мин

С целью определения оптимальных условий для получения гранул серопоглотителя с высокой механической прочностью выполнялись несколько опытов. Сначала путем перемешивания сухого оксида цинка и 5 % MgO с добавлением 4%-го раствора ПВС получили массу с оптимальной формовочной влажностью, которую затем формовали в гранулы. Таким способом было приготовлено три образца, время смешения оксидов с раствором ПВС у которых составляло 10, 20 и 40 мин соответственно. Оказалось, что с увеличением времени перемешивания механическая прочность возрастает с 10,60 до 15,24 МПа, что хорошо видно из данных, приведенных ниже:

Время смешения, мин	10	20	40
Механическая прочность при раздавливании, МПа	10,60	12,60	15,24

Вторая серия образцов была приготовлена с использованием 2%-го раствора ПВС и оксида магния, измельченного в течение 2, 5 и 10 мин. Механическая прочность формованных гранул серопоглотителя и средний размер частиц MgO и $Mg(OH)_2$ изменялись в зависимости от времени диспергирования MgO :

Время смешения, мин	2	5	10
Механическая прочность при раздавливании, МПа	3,8	4,6	7,3
Средний размер частиц MgO , нм	25,4	20,7	16,3
Средний размер частиц $Mg(OH)_2$, нм	14,4	15,1	19,7

Как видно из приведенных выше данных, механическая прочность в данной серии образцов также возрастает (с 3,8 до 7,3 МПа).

Анализ полученной информации позволяет сделать вывод, что на механическую прочность формованных гранул оказывают влияние дисперсность частиц и степень их гидратации (рис. 5).

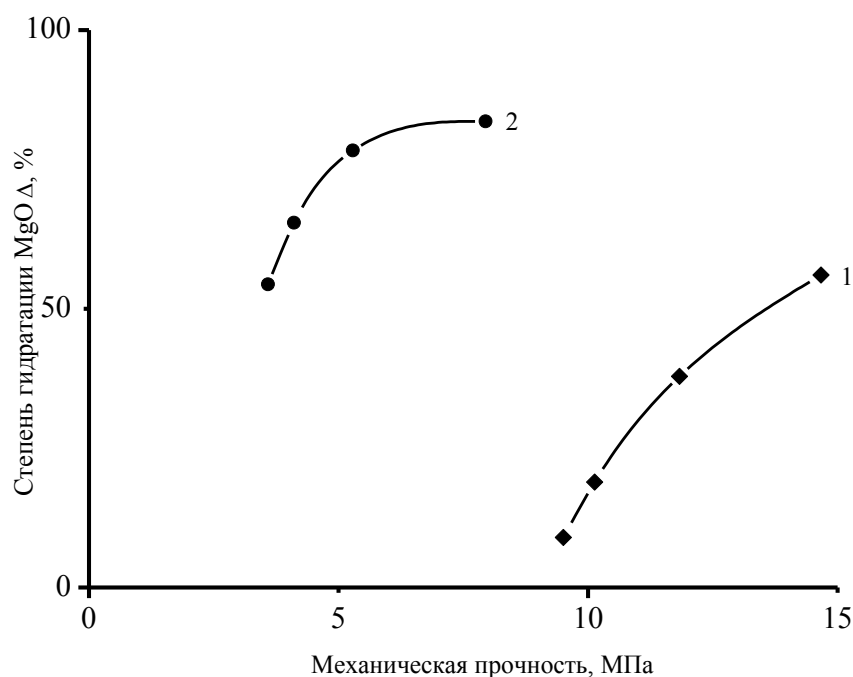


Рис. 5. Изменение механической прочности гранул серопоглотителя в зависимости от степени гидратации MgO : 1 – образец, полученный с использованием 4%-го раствора ПВС; 2 – образец, полученный с применением 2%-го раствора ПВС

Зависимость сероемкости исследованных образцов (рис. 6) показывает, что при достаточно высоком содержании в системе суспензии $MgO-H_2O$ не создаются прочные структуры, препятствующие получению однородной массы сорбента. Гидратированный оксид магния упрочняет структуру поглотителей на основе ZnO . Содержание ZnO в образцах адсорбентов оказывает влияние на общую сероемкость на всем интервале температур 100–350 °С. Максимум на дифференциальной кривой зависимости

сероемкости от температуры смещается в сторону более высоких температур при увеличении степени гидратации оксида магния. Это свидетельствует о меньшей реакционной способности, а следовательно, и адсорбционной активности образца, промотированного оксидом магния, время гидратации которого составляло 10 мин.

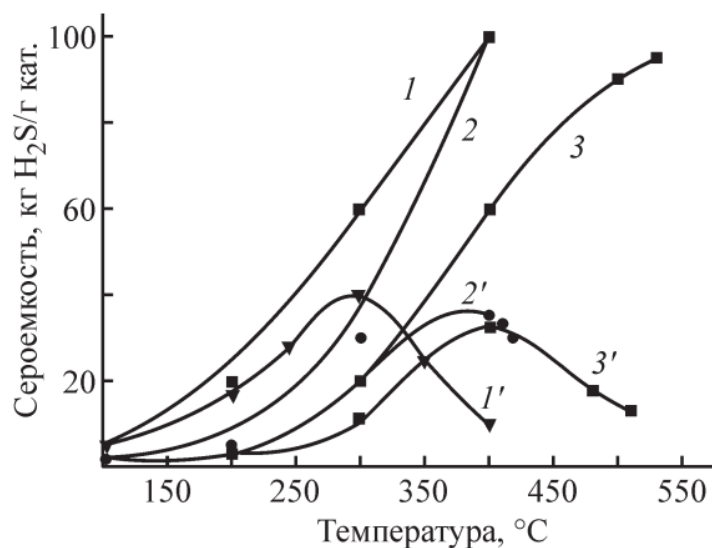


Рис. 6. Зависимость общей (1–3) и дифференциальной (1'–3') сероемкости от температуры для образцов при времени гидратирования MgO: 1, 1' – 10 мин; 2, 2' – 20 мин; 3, 3' – 40 мин

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для улучшения химико-реологических характеристик серопоглотителя на основе нанодисперсного ZnO в работе было предложено использовать промотирующую добавку в виде оксида магния разной степени гидратированности. Показано значительное влияние температуры, состава дисперсионной среды и диспергирования на процесс гидратации оксида магния. Методом рентгенофазового анализа определена степень гидратации серий образцов системы MgO-H₂O(ПВС), приготовленных различными способами. Показано влияние степени гидратации MgO на механическую прочность формованных гранул. Установлена зависимость сероемкости образцов от температуры. При увеличении степени гидратации оксида магния наблюдается смещение максимума на дифференциальной кривой в область высоких температур.

Полученные результаты могут быть использованы для улучшения технологии производства поглотителей сероводорода на основе оксида цинка.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-73-10210 (<https://rscf.ru/project/21-73-10210/>) и с применением ресурсов центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крылов О.В. Гетерогенный катализ: учебное пособие для вузов. М.: Академкнига. 2004. 679 с.
2. Васильев Ю.В., Платонов О.И. Сравнительная оценка активности катализаторов процесса Клауса // *Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов: Труды III Всероссийской научной конференции с международным участием: в 2 т.* Иваново: ИГХТУ. 2018. Т. 2. С. 67–68.
3. Афанасьев С.В., Садовников А.А., Гартман В.Л., Обысов А.В., Дульнев А.В. Промышленный катализ в газохимии: монография / под ред. С.В. Афанасьева. Самара: СНЦ. 2018. 160 с.
4. Киенская К.И., Мазитова Г.Т., Сардушкин М.В., Белова И.А. Синтез и свойства нанодисперсий оксида цинка, стабилизированных катионными фосфорсодержащими ПАВ // *Химическая промышленность.* 2019. Т. 96. № 2. С. 79–83.
5. Каграманов Ю.А., Рыжков А.Ф., Осипов П.В., Тупоногов В.Г. Исследование устойчивости сорбента на основе оксида цинка // *Труды Седьмой российской национальной конференции по теплообмену: в 3 т.* М.: МЭИ. 2018. Т. 1. С. 394–397.
6. Кацман Е.А., Прокофьев В.Ю., Гордина Н.Е., Афанасьева Е.Е. [и др.]. Теория и практика гетерогенных катализаторов и адсорбентов: коллективная монография / под ред. О.И. Койфмана. М.: ЛЕНАНД. 2020. 584 с.
7. Прокофьев В.Ю., Разговоров П.Б., Ильин А.П. Основы физико-химической механики экструзионных катализаторов и сорбентов: монография. М.: КРАСАНД. 2013. 320 с.
8. Прокофьев В.Ю., Ильин А.П., Басова Т.В. Исследование ранних стадий приготовления хемосорбента на основе оксида цинка // *Известия вузов. Химия и химическая технология.* 2006. Т. 49. № 4. С. 90–95.
9. Патент РФ 2580731. *Способ получения ультрадисперсного оксида цинка* / Ларьков А.П., Хатьков В.Ю., Садовников А.А., Земляков Ю.Д., Добрыдnev С.В., Молодцова М.Ю. Заявл. 11.06.2014. Опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10.
10. Каграманов Ю.А., Тупоногов В.Г., Рыжков А.Ф. Разработка системы глубокой сероочистки синтез-газов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика».* 2016. Т. 16. № 4. С. 5–11.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВЕРЕС Ксения Андреевна – магистрант кафедры технологии неорганических веществ, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», 153000, Россия, г. Иваново, пр-т Шереметевский, 7. E-mail: vereskami@gmail.com

УСОВ Владислав Вадимович – студент кафедры технологии неорганических веществ, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», 153000, Россия, г. Иваново, пр-т Шереметевский, 7. E-mail: vladus1202@gmail.com

ИЛЬИН Александр Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии неорганических веществ, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», 153000, Россия, г. Иваново, пр-т Шереметевский, 7. E-mail: ilyin@isuct.ru

КОЧЕТКОВ Сергей Павлович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры строительного производства, филиал ФГБОУ ВО «Московский государственный машиностроительный университет», 140402, Россия, Московская область, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, 408. E-mail: ilyin@isuct.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Верес К.А., Усов В.В., Ильин А.А., Кочетков С.П. Влияние степени гидратации MgO на свойства Zn-Mg поглотителя сероводорода // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2022. № 3 (15). С. 73–83.

**INFLUENCE OF MgO HYDRATION DEGREE
ON PROPERTIES OF Zn-Mg HYDROGEN SULFIDE ABSORB**

K.A. Veres, V.V. Usov, A.A. Ilyin, S.P. Kochetkov

Abstract. The physical and sorption characteristics of a hydrogen sulfide absorber based on zinc oxide have been studied. It is indicated that magnesium oxide of varying degrees of hydration was used as a promotional additive in the work. The results of a study using X-ray phase analysis of the MgO hydration process in water are presented. It was found that with an increase in the hydration time of the magnesium oxide additive from 10 to 40 min, the temperature of the maximum sulfur capacity of the sample increases by 100 °C.

Keywords: zinc absorber, magnesium oxide, sulfur capacity.

REFERENCES

1. Krylov O.V. Geterogennyy kataliz: uchebnoye posobiye dlya vuzov [Heterogeneous catalysis: Textbook for universities]. M.: Akademkniga. 2004. 679 p.
2. Vasiliev Yu.V., Platonov O.I. Comparative evaluation of the activity of catalysts in the Claus process. *Actual problems of the theory and practice of heterogeneous catalysts and adsorbents: Proceedings of the III All-Russian scientific conference with international participation: in 2 vol.* Ivanovo: ISHTU, 2018. Vol. 2, pp. 67–68. (In Russian).
3. Afanasiev S.V., Sadovnikov A.A., Gartman V.L., Obysov A.V., Dulnev A.V. Promyshlennyy kataliz v gazokhimii: monografiya [Industrial catalysis in gas chemistry: monograph] / ed. S.V. Afanasiev. Samara: SNC. 2018. 160 p.
4. Kienskaya K.I., Mazitova G.T., Sardushkin M.V. [et al.]. Synthesis and properties of zinc oxide nanodispersions stabilized by cationic phosphorus-containing surfactants. *Khimicheskaya promyshlennost'*. 2019. Vol. 96. No. 2, pp. 79–83. (In Russian).
5. Kagramanov Yu.A., Ryzhkov A.F., Osipov P.V., Tuponogov V.G. Study of the stability of a sorbent based on zinc oxide. *Proceedings of the seventh Russian national conference on heat transfer: in 3 vol.* Moscow: MPEI. 2018. Vol. 1, pp. 394–397.
6. Katsman E.A., Prokofiev V.Yu., Gordina N.E., Afanas'eva E.E. [et al.]. Teoriya i praktika geterogennykh katalizatorov i adsorbentov: kollektivnaya monografiya [Theory and practice of heterogeneous catalysts and adsorbents: a collective monograph] / ed. O.I. Koifman. Moscow: LENAND. 2020. 584 p.
7. Prokofiev V.Yu., Razgovorov P.B., Ilyin A.P. Osnovy fiziko-khimicheskoy mekhaniki ekstruzionnykh katalizatorov i sorbentov: monografiya [Fundamentals of physical and chemical mechanics of extrusion catalysts and sorbents: monograph]. Moscow: KRASAND. 2013. 320 p.

8. Prokofiev V.Yu., Ilyin A.P., Basova T.V. Investigation of the early stages of preparation of a chemisorbent based on zinc oxide. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2006. Vol. 49. No. 4, pp. 90–95. (In Russian).
9. Patent RF 2580731. *Sposob polucheniya ul'tradispersnogo oksida tsinka* [Method for producing ultrafine zinc oxide]. Larkov A.P., Khatkov V.Yu., Sadovnikov A.A., Zemlyakov Yu.D., Dobrydnev S.V., Molodtsova M.Yu. Declared 06.11.2014. Published 04.10.2016. Bulletin No. 10. (In Russian).
10. Kagramanov Yu.A., Tuponogov V.G., Ryzhkov A.F. Development of a system for deep desulfurization of synthesis gases. *Vestnik YUUrGU. Seriya «Energetika»*. 2016. Vol. 16. No. 4, pp. 5–11. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

VERES Ksenia Andreevna – Undergraduate of the Department of Technology of Inorganic Substances, FSBEI HE «Ivanovo State University of Chemistry and Technology», 7, Sheremetevsky ave., Ivanovo region, Ivanovo, 153000, Russia. E-mail: vereskami@gmail.com

USOV Vladislav Vadimovich – Student of the Department of Technology of Inorganic Substances, FSBEI HE «Ivanovo State University of Chemistry and Technology», 7, Sheremetevsky ave., Ivanovo region, Ivanovo, 153000, Russia. E-mail: vladus1202@gmail.com

ILYIN Alexander Alexandrovich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Technology of Inorganic Substances, FSBEI HE «Ivanovo State University of Chemistry and Technology», 7, Sheremetevsky ave., Ivanovo region, Ivanovo, 153000, Russia. E-mail: ilyin@isuct.ru

KOCHETKOV Sergey Pavlovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Construction Production, FSBEI HE «Moscow State Machine-Building University», 408, October Revolution st., Kolomna, Moscow region, 140402, Russia. E-mail: ilyin@isuct.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Veres K.A., Usov V.V., Ilyin A.A., Kochetkov S.P. Influence of MgO hydration degree on properties of Zn-Mg hydrogen sulfide absorb // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2022. No. 3 (15), pp. 73–83.

УДК 674.093

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЧЕРЕДНОГО УДЛИНЕНИЯ РЯДА НАБЛЮДЕНИЙ ЗА КИСЛОТНОСТЬЮ ОСАДКОВ, ВЫПАДАЮЩИХ В ТВЕРИ

Ф.В. Качановский

Тверской государственной технической университет (г. Тверь)

© Качановский Ф.В., 2022

Аннотация. Проведен статистический анализ динамики кислотности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 1990–2021 годах. Установлено, что в последние пять-шесть 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 девять лет изменилась несущественно.

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

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-3-83-93

Кислотность атмосферных осадков существенно определяет состояние природной среды, а ее показатель pH служит одной из важных экологических характеристик. В Твери наблюдения за кислотностью атмосферных осадков с 1990 года ведет лаборатория мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии. Полученные лабораторией результаты автор настоящей статьи с 2009 года использует для проведения статистического анализа показателя кислотности pH и регулярно публикует результаты [1–10].

Срочные значения показателя pH , наблюденные за 1990–2021 годы, преобразованы в среднемесячные значения, множество которых образует временной ряд протяженностью 32 года с постоянным (месячным) шагом. Число членов (месяцев) ряда достигло 396. Члены ряда обозначаются как $ampH$, а номера членов ряда – как t . Временной ряд значений $ampH$ подвергнут статистическому анализу.

Временная последовательность среднемесячных значений показателя кислотности $ampH$ за 1990–2021 годы представлена на рис. 1. Разброс значений $ampH$ за весь период наблюдений вписывается в диапазон 4,3–7,8 единиц. При сравнительно равномерных колебаниях значений $ampH$ с течением времени происходит их (значений) постепенное снижение. Обращает на себя внимание то, что с октября 2005 года до февраля 2009 года равномерные колебания $ampH$ нарушает интервенция (вмешательство) некоторого фактора неизвестного происхождения. Интервенция приводит к удвоению амплитуды колебаний $ampH$. Продолжительность интервенции достаточно велика (более трех лет).

Последовательность значений $ampH$ рассматривается при анализе как нестационарный временной ряд. С учетом результатов предыдущих исследований [1–5] статистическая модель ряда $ampH$ принята состоящей из четырех аддитивных компонент: трех детерминированных (циклической, сезонной и тренда) и одной случайной [11].

Тренды рядов $ampH$ разной длины показывают, что в течение почти тридцати лет среднемесячные значения $ampH$ снижались, то есть кислотность атмосферных осадков, выпадающих в Твери, росла. При этом скорость снижения $ampH$ с 2002 года уменьшалась, о чем свидетельствовало появление точек перегиба на линиях трендов. Срединная часть линий кубических трендов (в 1995–2010 годы) была сравнительно устойчивой и указывала на постепенное и равномерное уменьшение значений $ampH$.

Тренды рядов трех последних лет (длиной 30, 31 и 32 года) описываются уравнениями:

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

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

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

где t – порядковый номер месяца в ряду.

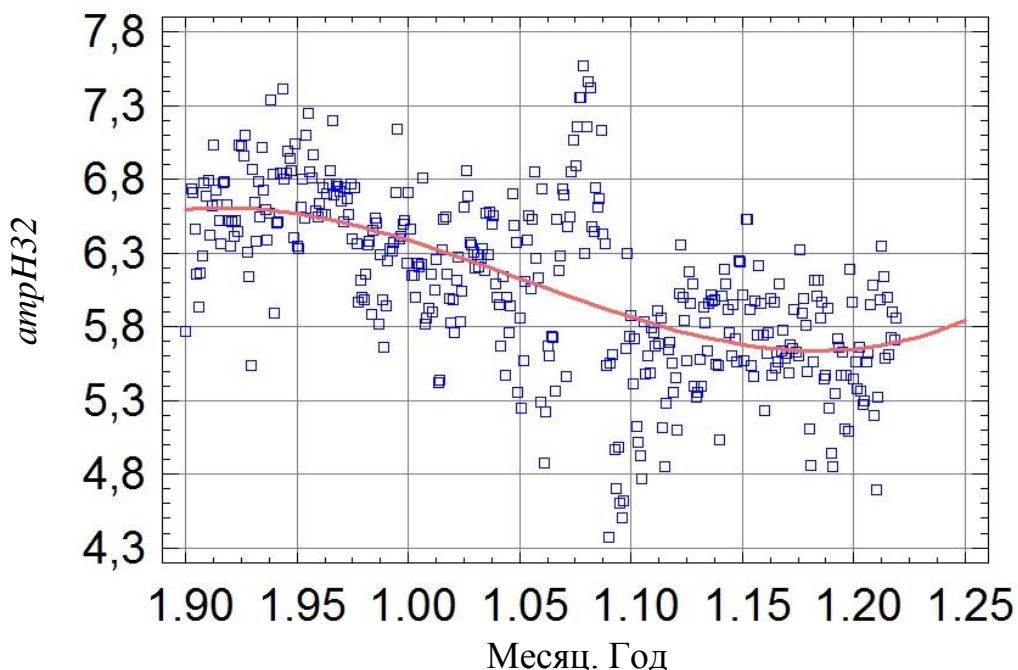


Рис. 1. Временная последовательность $atpH32$ в январе в разные годы (1990–2021) и ее кубический тренд

Уравнения (1)–(3) показывают, что при удлинении ряда $atpH$ коэффициенты кубической модели тренда изменяются несущественно и немонотонно. Свободный член у 31-летнего ряда имеет значения, несколько большие, чем у 30-летнего и 32-летнего рядов, а абсолютные значения других коэффициентов этого ряда, наоборот, меньшие значения, чем у предыдущего и последующего рядов. Тренды, описываемые уравнениями (1)–(3), показаны на рис. 2.

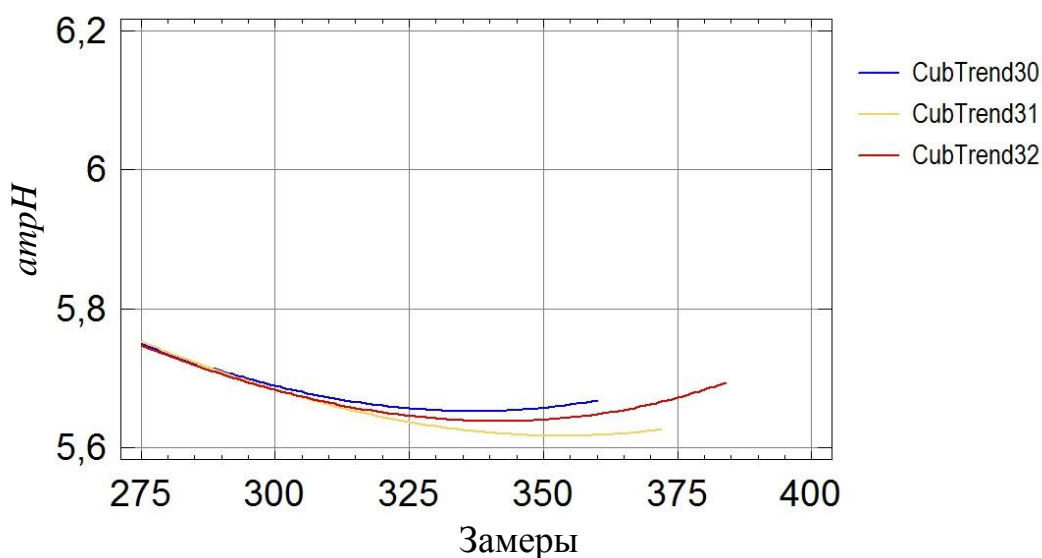


Рис. 2. Концевые участки трендов (месяцы) $atpH30$, $atpH31$ и $atpH32$

На большей (срединной) части своей длины тренды практически совпадают [9], то есть единообразно описывают моделируемую временную последовательность. Только на конечном участке модель тренда заметно реагирует на удлинение ряда.

Перегиб линий тренда, с которого начинает уменьшаться скорость снижения значений $ampH$, то есть 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 $t = 337$ (январь 2018 года), то есть достигается за 23 месяца до конца ряда. Затем начинается ускоренный рост значений $ampH$, продолжающийся до конца расчетного периода. Минимум одного модельного тренда не означает, разумеется, что реальный процесс снижения значений показателя $ampH$ остановился. Это очевидно из дальнейшего рассмотрения трендов более длинных рядов. Так, тренд 31-летнего ряда достигает своего минимума ($ampH = 5,616\ 48$) в мае 2019 года, то есть за 19 месяцев до конца ряда. Наконец, минимум 32-летнего ряда ($ampH = 5,637\ 59$) наступает в июне 2018 года, то есть за 42 месяца до конца ряда. При этом значение минимума 32-летнего ряда оказывается несколько больше, чем у 31-летнего ряда. Такое соотношение параметров сравниваемых рядов позволяет предположить, что минимум среднемесячных значений показателя кислотности $ampH$ в 2019–2021 годах практически достигнут.

Сезонной декомпозицией 32-летнего ряда $ampH$ (1990–2021 годы) в нем выделена случайная компонента, а также сумма тренда и циклической компоненты. Эта сумма показана на рис. 3 вместе с кубическим трендом $ampH_{32}$. Из суммы вычтен кубический тренд и получена циклическая компонента, показанная на рис. 4 в виде отклонений от нулевых значений.

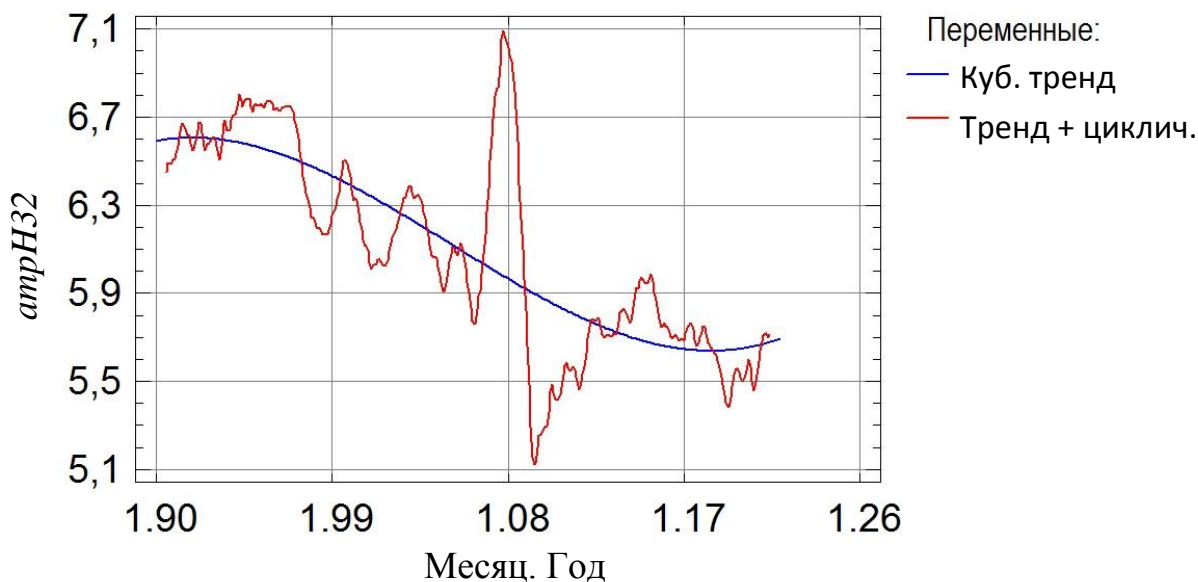
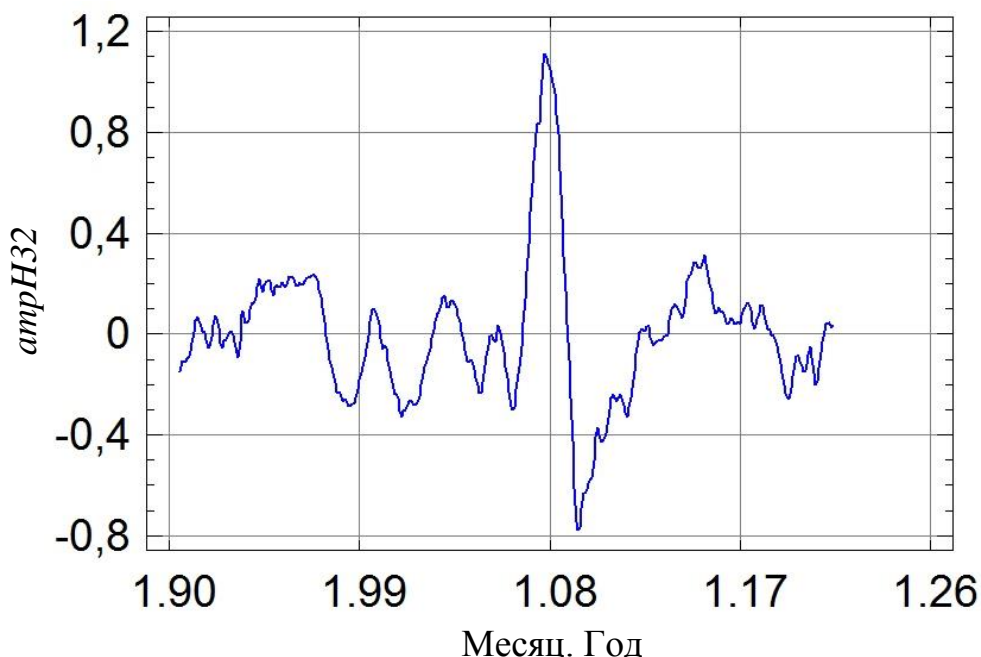
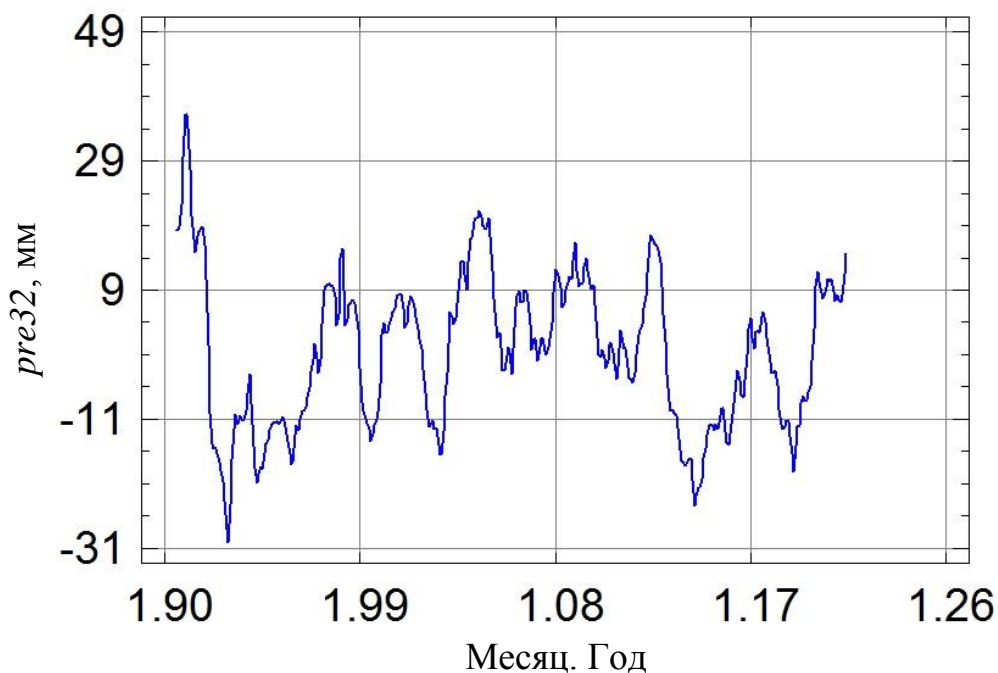
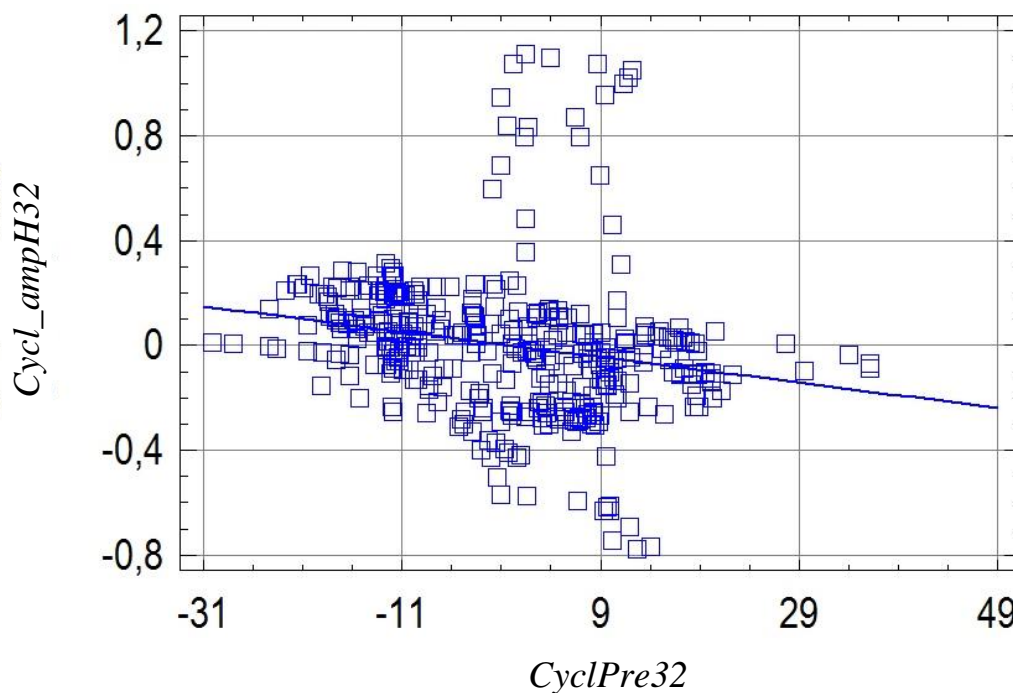


Рис. 3. Кубический тренд $ampH_{32}$ и сумма тренда и циклической компоненты ряда $ampH_{32}$ (1990–2021 годы)

Рис. 4. Циклическая компонента ряда $ampH32$ (1990–2021 годы)

При удлинении ряда наблюдений pH на год (2021-й) характерные черты циклической компоненты остались прежними. Видна не только интервенция «2005–2009 годы», но также «мини-интервенция», приходящаяся на 2015 год (обсуждена в [9]). Отметим, что разброс значений у циклической компоненты $ampH32$ значительно меньше, чем у исходного ряда, и составляет $\sim 1,1$ единиц по сравнению с разбросом значений $ampH31$ в диапазоне $\sim 1,8$. В [9] уже отмечалась условность самого названия этой компоненты («циклическая») применительно к показателю кислотности pH . Она 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.

Закономерен вопрос: проявляется ли влияние факторов, определяющих изменчивость величины $ampH$, на характер изменений ее циклической компоненты? Отсутствие сведений о факторах влияния вынуждает нас произвести проверку связей предполагаемых факторов и циклической компоненты. Оценим, например, корреляцию между циклическими компонентами $ampH32$ и ряда осадков $cyclPre32$. Для этого выполним сезонную декомпозицию ряда месячных сумм осадков так же, как это сделано для $ampH32$, и выделим циклическую компоненту осадков (рис. 5). При визуальном сравнении рис. 4 и 5 явного сходства сравниваемых величин не наблюдается. Более того, на циклической компоненте осадков отсутствуют какие-либо следы интервенции 2005–2009 годов, что указывает на возможное отсутствие общих существенных факторов влияния на сравниваемые величины. Линейная регрессия между циклическими компонентами $ampH32$ и $cyclPre32$, показанная на рис. 6, обнаруживает слабую (однако статистически значимую (на 95%-м уровне вероятности)) отрицательную связь, которая характеризуется коэффициентом корреляции $-0,2028$.

Рис. 5. Циклическая компонента ряда осадков $pre32$ (1990–2021 годы)Рис. 6. Линейная регрессия циклических компонент $ampH32$ и осадков $pre32$

Оценим корреляцию между циклическими компонентами $ampH32$ и ряда температур $tem32$. Для этого выполним сезонную декомпозицию ряда среднемесячных температур воздуха $Tem32$. Полученная таким образом циклическая компонента температурного ряда $suclTem32$ показана на рис. 7. Сравнение циклических компонент $ampH32$ и $suclTem32$

показывает, что между ними существует относительно слабая (но статистически значимая) положительная связь (рис. 8), характеризующаяся коэффициентом корреляции 0,191 15. Абсолютное значение этого коэффициента несущественно отличается от абсолютного значения коэффициента корреляции между $ampH32$ и $cyclPre32$.

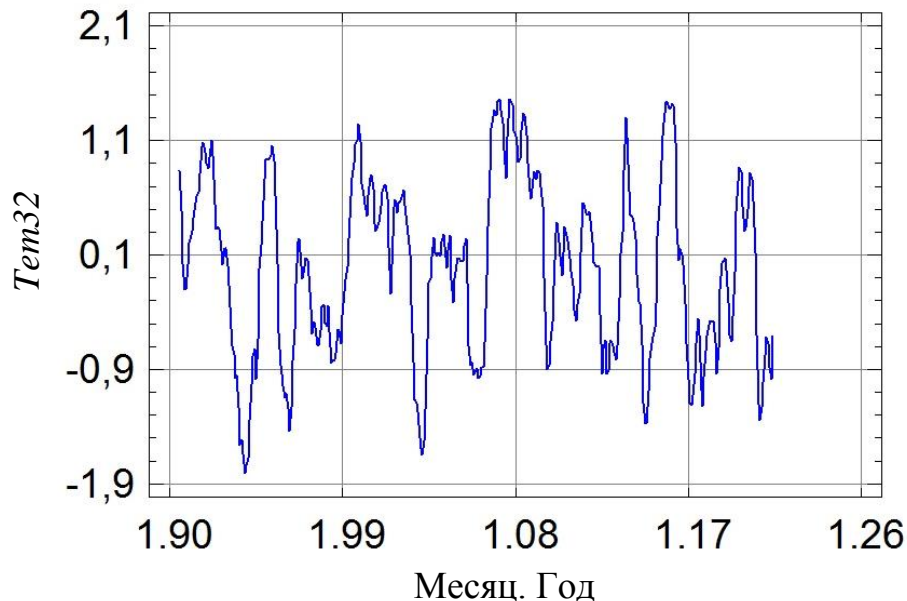


Рис. 7. Циклическая компонента ряда температур $Tem32$ (1990–2021 годы)

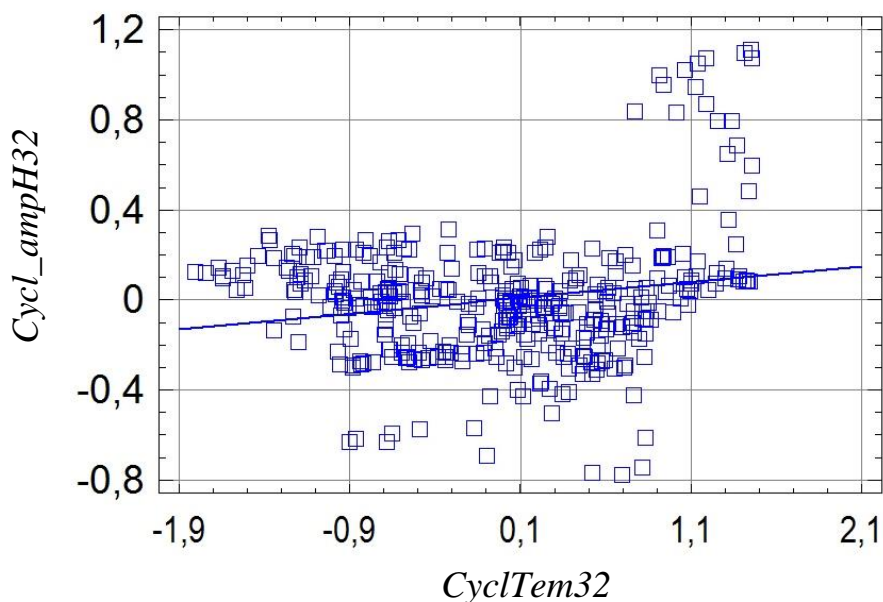


Рис. 8. Линейная регрессия циклических компонент $ampH32$ и температур $Tem32$

Таким образом, нельзя утверждать, что температура воздуха, как и количество осадков, есть важный (лидирующий) фактор, формирующий циклические колебания кислотности осадков.

Внутригодовая динамика показателя $ampH$ характеризуется месячными индексами, которые определяются как простое среднее \hat{s}_i отклонений значений $ampH$ от тренда [8, 11]:

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

где $m + 1 = 32$ – число периодов (лет) в ряду наблюдений.

На рис. 9 представлены месячные индексы 32-летних рядов $ampH$ и температур воздуха Tem_{32} . Монотонный рост значений температурных индексов от начала года до июля и монотонное снижение их от июля до конца года соответствуют привычным представлениям о внутригодовом ходе температур. Изменения индексов ряда $ampH$ имеют совершенно иной характер. Локальные минимумы в феврале, мае, июле и октябре чередуются с локальными максимумами в апреле, июне, сентябре и ноябре. Глобальный максимум температурных индексов наступает на два месяца позже максимума индексов $ampH$. Тем не менее общий характер изменений индексов сравниваемых величин оказывается сходным: зимой отклонения среднемесячных значений от трендов положительные, а в теплое время года отрицательные. Между месячными индексами 32-летних временных рядов $ampH$ и температурой воздуха amT установлена умеренно сильная положительная связь. Коэффициент корреляции связи имеет то же значение (0,552), что и для более коротких рядов. За последнюю четверть века он практически не изменился, что свидетельствует о стабильности климатических условий в районе наблюдений.

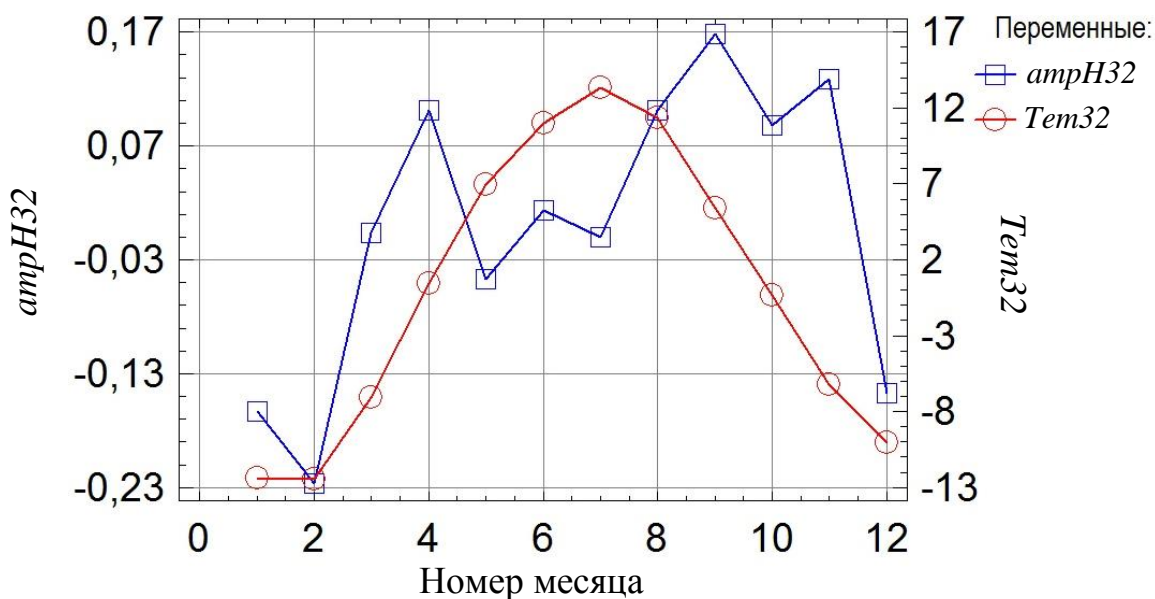


Рис. 9. Сезонные индексы рядов $ampH_{32}$ и температур Tem_{32}

Случайная компонента $X(t)$ ряда $ampH_{32}$ моделировалась, как и в случае более коротких рядов [1–9], комбинированным случайным процессом авторегрессии – скользящего среднего ARMA (p, q) [10], параметры p и q в котором означают порядок процессов авторегрессии и скользящего среднего. 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 (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 32-летнего ряда *атрН* достигается при $p = 3$ и $q = 2$, то есть при тех же значениях, что и для ряда длиной в 29 лет (2010–2018 годы). Это указывает на короткую (около трех месяцев) «память» у исследуемой величины.

ВЫВОДЫ

1. Главный результат анализа состояния 32-летнего ряда наблюдений за показателем *pH* кислотности атмосферных осадков, выпадающих в Твери: наблюдавшееся в течение многих лет снижение среднемесячных значений показателя прекратилось. В течение пяти-шести последних лет (2015–2021 годы) средние значения показателя кислотности *pH* колебались в пределах 5,6–5,8, значит, временной ряд стабилизировался.

2. Принятая (начиная с 26-летнего ряда наблюдений) кубическая модель тренда в очередной раз подтвердила свою пригодность для удлинившегося (32-летнего) ряда.

3. Обнаружено, что циклическая компонента 32-летнего ряда среднемесячных значений исследуемого показателя *атрН* имеет относительно слабую (коэффициент корреляции – 0,202 8) отрицательную связь с циклической компонентой атмосферных осадков и относительно слабую положительную связь с циклической компонентой температур воздуха (коэффициент корреляции – 0,191 15). Тренд и случайная компонента ряда существенных изменений в результате удлинения ряда не претерпели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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, 15 мая 2019 г.* / под ред. А.А. Артемьева, В.В. Белова, Т.Р. Баркая. 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. 66–75.
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. Результаты очередного удлинения ряда наблюдений за кислотностью осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 83–93.

RESULTS OF ORDINARY LENGTHENING OBSERVATIONS THE PRECIPITATION'S 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 1990–2021 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 tehničeskogo 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 tehničeskogo 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: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, May 15, 2019* / ed. A.A. Artemyev, V.V. Belov, T.R. Barkay. 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 himicheskie tehnologii»*. 2020. No. 2 (6), pp. 66–75. (In Russian).
10. Kachanovsky F.V. Behaviour of the precipitations acidity in Tver, 1990–2020. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himicheskie tehnologii»*. 2021. No. 3 (11). pp. 105–113. (In Russian).
11. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. *Statisticheskiy analiz dannykh 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 A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. Results of ordinary lengthening observations the precipitation's acidity in Tver // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2022. No. 3 (17), pp. 83–93.

УДК 627.157:002.637(282.247.41)

**ОЦЕНКА УРОВНЯ НАКОПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ
В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ***Г.Н. Иванов, И.В. Кривенко, М.А. Смирнова, С.Р. Испирян
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*© Иванов Г.Н., Кривенко И.В.,
Смирнова М.А., Испирян С.Р., 2022

Аннотация. Отмечено, что одним из важнейших показателей эффективной и надежной оценки экологического состояния водного объекта является содержание тяжелых металлов в его донных отложениях, содержащих полную геохимическую информацию об эволюции водного объекта. Приведены результаты анализа проб донных отложений, отобранных в Верхневолжских озерах и Иваньковском водохранилище. Сделан вывод, что состав рассматриваемых отложений свидетельствует о наличии различных зон, соответствующих уровню загрязнения и особенностям формирования состава этих отложений. Выделены три географические зоны на территории Верхней Волги, характеризующиеся различным (с точки зрения содержания тяжелых металлов и отравляющих веществ в донных отложениях) экологическим состоянием. Подчеркнуто, что на основании верифицируемых сведений об экологическом состоянии водного объекта возможна грамотная его эксплуатация.

Ключевые слова: состояние водного объекта, донные отложения, тяжелые металлы, отравляющие вещества, степень загрязненности, водный объект.

DOI: 10.46573/2658-7459-2022-3-94-100**ВВЕДЕНИЕ**

Изучение химического состава донных отложений в последние годы стало важным звеном в оценке экологического состояния водных объектов, поскольку именно состав донных отложений дает информацию о загрязнении такого объекта вследствие хозяйственной деятельности человека на его водосборной территории и наиболее адекватно отражает его современное состояние.

Донные отложения формируются в результате сложного взаимодействия климатических, гидрологических, механических, физических, химических, биологических и других процессов, протекающих во времени как на водосборной площади, так и в самом водном объекте. В наиболее активной составляющей поверхностного слоя донных отложений, представленной глинистыми минералами, оксидами железа и марганца, органическим веществом, образовавшимся вследствие процессов сорбции, ионного обмена и коагуляции, фиксируется техногенное загрязнение окружающей среды, то есть анализ состава донных отложений позволяет получить геохимическую информацию об условиях, существовавших ранее в окружающем водный объект географическом комплексе.

Верхние горизонты донных отложений могут помочь в выявлении (в зависимости от гидрологических условий) степени техногенного загрязнения окружающей среды за последние 3–12 месяцев [1].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На тверском участке Верхней Волги пробы донных отложений отбирались в озерах Стерж, Вселуг, Пено и Волго (рис. 1); на речном участке – выше плотины-бейшлота (подпоры Верхневолжских озер); выше и ниже населенных пунктов по берегам Волги; в устьях некоторых крупных притоков Волги; в Иваньковском водохранилище (рис. 2) – на участках Волжского и Иваньковского плесов. Отбор проб производился в летний период.

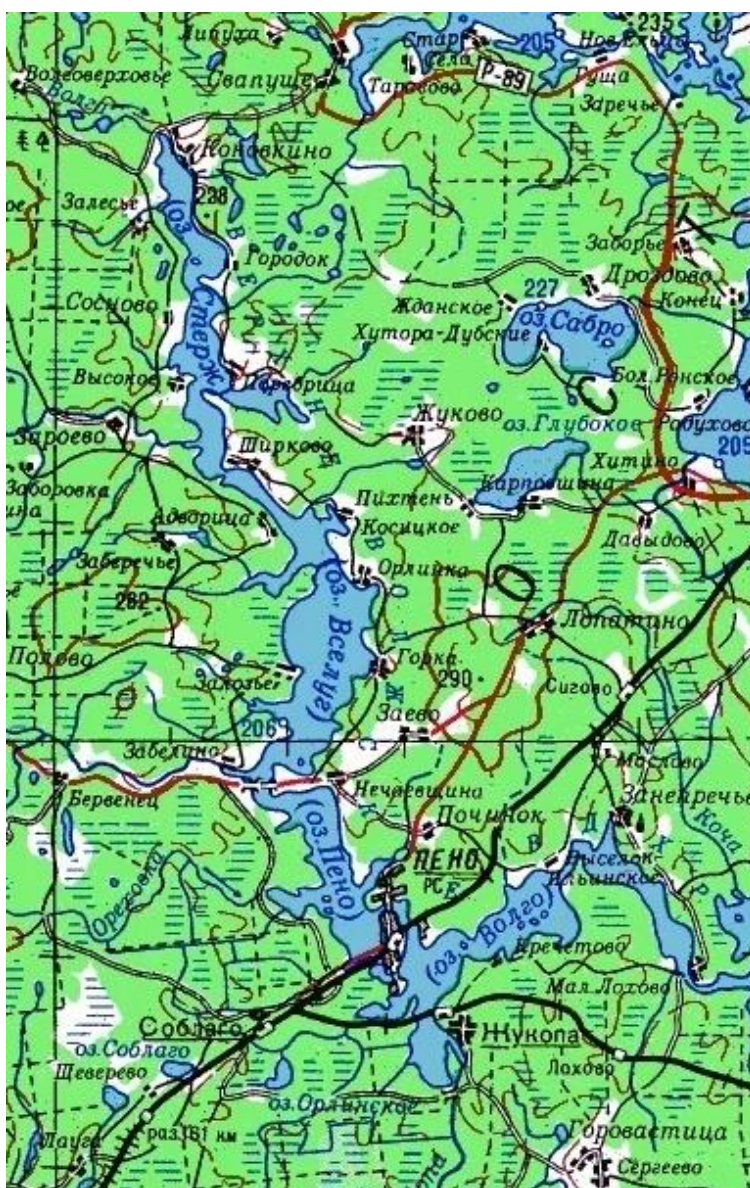


Рис. 1. Общий вид Верхневолжских озер



Рис. 2. Ивановское водохранилище

Для отбора проб донных отложений использовали челночный геологоразведочный бур ТБГ-1 или грейдерный дночерпатель (в зависимости от глубины воды и характера донных отложений) [2]. Определение концентрации тяжелых металлов в пробах донных отложений осуществлялось атомно-адсорбционным методом после их разложения в «царской водке» [3]. Анализы проводились на геологическом факультете МГУ и в Институте геохимии Гейдельбергского университета [4].

Степень загрязнения донных отложений тяжелыми металлами оценивалась по различным критериям (показателю накопления, суммарному показателю загрязнения и $I_{\text{гео}}$ -классам) [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По результатам исследования содержания тяжелых металлов в донных отложениях Верхней Волги были выделены три зоны в зависимости от уровня загрязнения и особенностей накопления.

Первый участок – Верхневолжское водохранилище. По отношению к остальным участкам (Волга ниже бейшлота и Ивановское водохранилище) в среднем здесь наблюдаются более низкие концентрации тяжелых металлов. Для некоторых пунктов наблюдения (в заливах, в зоне подпора бейшлота) повышение содержания тяжелых металлов в донных отложениях обусловлено замедленным водообменом и, как показал корреляционный анализ, накоплением органических веществ.

Второй участок – собственно Волга ниже бейшлота до Ивановского водохранилища (села Городня) – характеризуется постепенным повышением содержания тяжелых металлов в донных отложениях вниз по течению реки с пиками загрязнения в зоне населенных пунктов. Корреляционные связи между содержанием тяжелых металлов и органических веществ в указанных отложениях, по сравнению с Верхневолжскими озерами, на этом участке имеют иной характер. Наиболее сильная корреляционная связь выявлена между содержанием Mn и остальными тяжелыми металлами. Для этого участка из-за довольно быстрого течения несвойственно накопление донных отложений с высоким содержанием органических веществ. В зонах промышленных загрязнений происходит изменение форм миграции тяжелых металлов: преобладают легкообменные карбонатные и гидроокисные формы с образованием так называемых техногенных илов.

Третий участок – Ивановское водохранилище – характеризуется многократным увеличением содержания Cd, Zn, Pb и Cu по сравнению с первыми двумя. Максимальные концентрации тяжелых металлов выявлены в приплотинной части водохранилища.

Расчет суммарного показателя загрязнения донных отложений показал, что наиболее загрязнены донные отложения в поселке городского типа Селижарово, городах Зубцов, Старица, Тверь (уровень – «умеренно загрязненные»). В Ивановском водохранилище, вблизи Конаково (в приплотинной части водохранилища) и некоторых других местах показатель загрязнения донных отложений тяжелыми металлами достигает очень высокого уровня.

В некоторых пунктах наблюдения уровень содержания тяжелых металлов в донных отложениях Верхней Волги для Cd и Zn, согласно $I_{\text{гео}}$ -классам, оценивался как умеренно загрязненный», а для Pb – как среднезагрязненный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Верхневолжского бассейна показало, что на рост рассмотренных загрязнений влияют выбросы и промышленные, и отходов бытовой хозяйственной деятельности человека. В результате ухудшается экологическое состояние водных объектов, особенно вблизи крупных населенных пунктов.

Содержание тяжелых металлов и отравляющих веществ в донных отложениях, с нашей точки зрения, является важнейшим критерием экологического состояния водного объекта [6, 7], позволяющим выработать рекомендации по использованию этого объекта, застройке и промышленной эксплуатации близлежащих территорий, а также мероприятий по его охране, в том числе внедрению и эксплуатации современных водоочистных сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коломийцев Н.В., Ильина Т.А., Киселева О.Е., Иванов Г.Н. Тяжелые металлы в донных отложениях озера Селигер // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2006. № 5. С. 21–25.
2. Женихов Ю.Н., Кузовлев В.В., Иванов Г.Н., Левинский В.В. Экология Верхневолжской водной системы: монография. Тверь: ТГТУ. 2010. 104 с.
3. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия: учебник. М.: Логос. 2000. 627 с.
4. Коломийцев Н.В., Корженевский Б.И., Ильина Т.А., Аверкина Т.И., Самарин Е.Н., Иванов Г.Н., Мюллер Г., Яхья А. Загрязнение водных экосистем озера Селигер тяжелыми металлами // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2004. № 5. С. 43–46.
5. Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р. Методы оценки загрязнения донных отложений тяжелыми металлами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 79–86.
6. Kwon Y.-T., Lee C.-W. Application of multiple ecological risk indices for the evaluation of heavy metal contamination in a coastal dredging area // *The Science of the Total Environment*. 1998. Vol. 214, pp. 203–210.
7. Kwon Y.-T., Lee C.-W. Sediment metal speciation for the ecology risk assessment // *Analytical Science*. 2001. Vol. 17 (5), pp. 653–658.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ИВАНОВ Григорий Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, доцент кафедры горного дела, природообустройства и промышленной экологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: ivanovgrigoriy@mail.ru

КРИВЕНКО Ирина Валерьевна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: krivenko-irina@mail.ru

СМИРНОВА Марина Анатольевна – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информатики и прикладной математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: mar-smir@yandex.ru

ИСПИРЯН Светлана Рафаиловна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры общей физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: ispirian-tstu@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Иванов Г.Н., Кривенко И.В., Смирнова М.А., Испирян С.Р. Оценка уровня накопления тяжелых металлов в донных отложениях // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 94–100.

**ESTIMATION THE LEVEL
OF ACCUMULATION HEAVY METALS
IN BOTTOM SEDIMENTS**

**G.N. Ivanov, I.V. Krivenko,
M.A. Smirnova, S.R. Ispiryayev**
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. It is noted that one of the most important indicators of an effective and reliable assessment of the ecological state of a water body is the content of heavy metals in its bottom sediments containing complete geochemical information about the evolution of a water body. The results of the analysis of samples of bottom sediments taken in the Upper Volga lakes and the Ivankovsky reservoir are presented. It is concluded that the composition of the deposits under consideration indicates the presence of various zones corresponding to the level of pollution and the peculiarities of the formation of the composition of these deposits. Three geographical zones on the territory of the Upper Volga are distinguished, characterized by a different (in terms of the content of heavy metals and toxic substances in bottom sediments) ecological state. It is emphasized that on the basis of verified information about the ecological state of the water body, its competent operation is possible.

Keywords: state of the water body, bottom sediments, heavy metals, pollution degree of water bodies.

REFERENCES

1. Kolomijcev N.V., Il'ina T.A., Kiseleva O.E., Ivanov G.N. Heavy metals in the sediments of Lake Seliger. *Melioraciya i vodnoe khozyajstvo*. 2006. No. 5, pp. 21–25. (In Russian).
2. Zhenihov Yu.N., Kuzovlev V.V., Ivanov G.N., Levinskiy V.V. *Ekologiya Verhnevolzhskoy vodnoy sistemy: monografiya* [Ecology of the Upper Volga water system: monograph]. Tver: TGTU. 2010. 104 p.
3. Alekseenko V.A. *Ekologicheskaya geohimiya: uchebnik* [Ecological geochemistry: textbook]. Moscow: Lotos. 2000. 627 p.
4. Kolomiytsev N.V., Korzhenevsky B.I., Ilyina T.A., Averkina T.I., Samarin E.N., Ivanov G.N., Muller G., Yahya A. Pollution of water ecosystems of Lake Seliger heavy metals. *Melioraciya i vodnoe khozyajstvo*. 2004. No. 5, pp. 43–46. (In Russian).
5. Ivanov G.N., Krivenko I.V., Smirnova M.A., Ispiryayev S.R. Methods for estimating pollution of bottom sediments with heavy metals. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotekhnika i khimicheskiye tekhnologii»*. 2021. No. 1 (9), pp. 79–86. (In Russian).
6. Kwon Y.-T., Lee C.-W. Application of multiple ecological risk indices for the evaluation of heavy metal contamination in a coastal dredging area. *The Science of the Total Environment*. 1998. Vol. 214, pp. 203–210.

7. Kwon Y.-T., Lee, C.-W. Sediment metal speciation for the ecology risk assessment. *Analytical Science*. 2001. Vol. 17 (5), pp. 653–658.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

IVANOV Grigory Nikolaevich – Candidate of Geologo-mineralogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mining, Environmental Management and Industrial Ecology, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ivanovgrigoriy@mail.ru

KRIVENKO Irina Valer'ena – Candidate of Physico-mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Physics, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: krivenko-irina@mail.ru

SMIRNOVA Marina Anatol'evna – Candidate of Physico-mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Informatics and Applied Mathematics, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mar-smir@yandex.ru

ISPIRYAN Svetlana Rafailovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of General Physics, FSBEI HE «Tver State Technical University», 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ispirian-tstu@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Ivanov G.N., Krivenko I.V., Smirnova M.A., Ispiryani S.R. Estimation the level of accumulation heavy metals in bottom sediments // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2022. No. 3 (15), pp. 94–100.

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

**Vestnik of Tver State Technical
University. Series «Building,
Electrical engineering and chemical
technology»**

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 Белорусский национальный технический
университет, г. Минск, Республика Беларусь

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

Бронштейн Л.М. – химический факультет Индианского университета,
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., профессор ТвГТУ

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

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

Смирнов М.А. – к.т.н., доцент ТвГТУ

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
Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН

Ясинская Н.Н. – д.т.н., доц. ВГТУ, Республика Беларусь

**ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал № 3 (15), 2022

Редактор Ю.А. Якушева

Корректор Я.А. Петрова

Подписано в печать 30.11.2022

Дата выхода в свет 30.12.2022

Формат 60 x 84 1/8

Физ. печ. л. 12,75

Тираж 500 экз.

Цена свободная

Усл. п. л. 11,86

Заказ № 337

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 11,09

С – 102

Редакционно-издательский центр

Тверского государственного технического университета

Адрес издателя: 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22

Отпечатано в ООО «Научные технологии»

Центр инженерной печати

170024, г. Тверь, ул. Академическая, д. 14