

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 (11), 2021**

Тверь 2021

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2021. № 3 (11). 114 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 отраслям: 05.23.00 Строительство и архитектура; 05.09.00 Электротехника; 05.17.00 Химическая технология.

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.

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

ISSN 2658-7459 (печатн.)

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

**Учредитель и издатель**

ФГБОУ ВО «Тверской  
государственный технический  
университет»

**Адрес редакции**

170026, г. Тверь, наб. Афанасия  
Никитина, д. 22

**Тел. редакции** +7 (4822) 78-89-00

**E-mail:** common@tstu.tver.ru

Цена свободная

Дата выхода в свет 23.12.2021

Формат 60x84 1/8

Тираж 500 экз.

ISSN 2658-7459

*Главный редактор*

Гультияев В.И. – д.т.н., доц.

*Заместители главного редактора:*

Белов В.В. – д.т.н., проф.;

Луцик В.И. – д.х.н., проф.;

Макаров А.Н. – д.т.н., проф.

*Ответственный секретарь*

Новиченкова Т.Б. – к.т.н., доц.

*Редакционная коллегия:*

Качанов А.Н. – д.т.н., проф.;

Коротких Д.Н. – д.т.н., проф.;

Косивцов Ю.Ю. – д.т.н., проф.;

Лепешкин А.Р. – д.т.н.;

Матар П.Ю. – к.т.н., проф.;

Недосеко И.В. – д.т.н., проф.;

Никольский В.М. – д.х.н., проф.;

Строкова В.В. – проф. РАН, д.т.н.,  
проф.;

Трещев А.А. – д.т.н., проф.;

Фишер Х.-Б. – д.-инженер;

Ясинская Н.Н. – к.т.н., доц.

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

**Founder and Publisher**

Federal State Budget Educational  
Institution of Higher Education, Tver  
State Technical University

**Address**

22, embankment of Afanasiy Nikitin,  
170026, Tver, Russia

**Tel.** +7 (4822) 78-89-00

**E-mail:** common@tstu.tver.ru

Open price

Release Date 23.12.2021

Format 60x84 1/8

Printing run 500 copies

ISSN 2658-7459

*Editor-in-Chief*

Gul'tyaev V.I. – d.t.s., Assoc. Prof.

*Vice Editor-in-Chief*

Belov V.V. – d.t.s., Prof.;

Lucik V.I. – d.c.s., Prof.;

Makarov A.N. – d.t.s., Prof.

*Executive Secretary*

Novichenkova T.B. – k.t.s., Assoc. Prof.

*Editorial team*

Kachanov A.N. – d.t.s., Prof.;

Korotkih D.N. – d.t.s., Prof.;

Kosivcov Y.Y. – d.t.s., Prof.;

Lepeshkin A.R. – d.t.s.;

Matar P.Y. – k.t.s., HDR, Prof.;

Nedoseko I.V. – d.t.s., Prof.;

Nikol'skij V.M. – d.c.s., Prof.;

Stroкова V.V. – prof. RAS., d.t.s.,  
Prof.;

Treshchev A.A. – d.t.s., Prof.;

Fisher H.-B. – d.-engineer;

Yasinskaya N.N. – k.t.s., Assoc. Prof.

**СОДЕРЖАНИЕ****СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

<i>Джабаров А.С., Белов В.В.</i> Коррозионно-стойкие бетонные смеси ремонтного назначения.....	6
<i>Пузырев А.М., Козырева Л.В.</i> Актуальные вопросы нововведений в правилах по охране труда при работе на высоте .....	13
<i>Федоров В.В., Федоров М.В.</i> Социокультурный аспект градостроительного развития малых исторических поселений Тверского региона .....	21
<i>Черемных С.В.</i> Выпучивание стержня из стали 45 под действием осевого сжатия при упругой работе материала.....	26
<i>Ясюкович В.А., Трофимов В.И.</i> Оценка эффективности изоляции воздушного шума перегородок из бетонных блоков с неизвлекаемыми трубчатыми пустотообразователями.....	35

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

<i>Кузьмин Г.С.</i> Экономико-математическая модель оптимизации ремонтно-профилактического обслуживания коммутационно-пусковой аппаратуры с диагностикой состояния изоляции.....	45
<i>Маринова С.В.</i> Прогнозирование электропотребления как сфера системного подхода и экспериментальных решений на базе существующих моделей и методов.....	50
<i>Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А.</i> О центрах симметрии плоской выпуклой пластины.....	65

**ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ**

<i>Белов В.В.</i> Регулирование реологических свойств трехфазных дисперсных систем, применяемых для производства строительных материалов.....	73
<i>Карпенко И.И., Манаенков О.В., Ильина К.О., Молчанов В.П.</i> Разработка способов получения полисахаридных капсул для лекарственных форм на основе водных экстрактов морских водорослей.....	78
<i>Качановский Ф.В.</i> Поведение кислотности осадков, выпавших в Твери в 1990–2020 гг.....	105

**CONTENTS****CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**

<i>Dzhabarov A.S., Belov V.V.</i> Corrosion resistance of repair building mixes....	6
<i>Puzyrev A.M., Kozyreva L.V.</i> Urgent issues of innovations in work at height safety regulations.....	13
<i>Fedorov V.V., Fedorov M.V.</i> Architectural and landscape environment of historical settlements: from semantics to pragmatics.....	21
<i>Cheremnykh S.V.</i> Buckling of the steel rod 45 under the action of axial compression during the elastic operation of the material.....	26
<i>Yasyukovich V.A., Trofimov V.I.</i> Assessment of air noise isolation of partitions made of blocks with non-removable void generators.....	35

**ELECTRICAL ENGINEERING**

<i>Kuzmin G.S.</i> Economic and mathematical model of optimization of repair and preventive maintenance of switching and starting equipment with diagnostics of the insulation condition.....	45
<i>Marinova S.V.</i> Energy forecasting as a sphere of system approach and experimental solutions on the based existing models and methods.....	50
<i>Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A.</i> On the centers of symmetry of a flat convex plate.....	65

**CHEMICAL TECHNOLOGY**

<i>Belov V.V.</i> Regulation of rheological properties three-phase disperse systems used for the production of construction materials.....	73
<i>Karpenko I.I., Manaenkov O.V., Il'ina K.O., Molchanov V.P.</i> Development of methods for obtaining polysaccharide capsules for dosage forms based on water extracts of seaweed.....	78
<i>Kachanovsky F.V.</i> Behaviour of the precipitations acidity in Tver, 1990–2020.....	105

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 691.587

### КОРРОЗИОННО-СТОЙКИЕ БЕТОННЫЕ СМЕСИ РЕМОНТНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

*А.С. Джабаров, В.В. Белов**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Джабаров А.С., Белов В.В., 2021

**Аннотация.** В работе была рассмотрена одна из основных характеристик бетона, которая учитывается при ремонте и реконструкции строительных сооружений – коррозионная стойкость. Было выяснено, что для ее повышения нужно учитывать ряд необходимых требований к составу смеси. Помимо тяжелого бетона, для ремонтных работ также можно использовать мелкозернистый и порошковые бетоны, которые позволяют улучшить коррозионную стойкость.

**Ключевые слова:** коррозионная стойкость, минеральные добавки, ремонтные смеси, агрессивная среда, биологическая коррозия, кольматация.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2021-6-13**

#### ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатируемые строительные конструкции в разнообразных условиях (например, перепадов температуры и влажности), взаимодействующие с агрессивной средой, со временем могут терять свои свойства и разрушаться. Для ремонта и восстановления после таких разрушений в настоящее время используются сухие строительные смеси различного состава и назначения.

Выделяют сухие смеси для ремонтных работ:

поверхностно-восстановительные – применяются для заделывания небольших отверстий, трещин без восстановления несущей способности конструкций;

объемно-восстановительные – используются для восстановления несущей способности, защиты от агрессивных сред строительных конструкций;

инъекционные – применяются для быстрого восстановления монолитности бетона (заполнения трещин, пустот в бетонной конструкции, находящейся в различных условиях эксплуатации) [1].

Важными характеристиками при проектировании составов ремонтных смесей являются:

адгезия к ремонтируемому основанию;

коэффициент линейного расширения [2];

морозостойкость;

прочность материала, низкая усадка, трещиностойкость [3];

коррозионная стойкость в эксплуатируемой среде.

Цель данной работы заключается в изучении способов улучшения коррозионной стойкости бетона.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Коррозия бетона – это сложный физико-химический процесс взаимодействия составных компонентов бетона и внешней неблагоприятной среды, в результате которого в структуре бетона появляются новообразования и часть компонентов выводится, снижается прочность бетона и со временем происходит его разрушение.

Коррозионная стойкость бетона зависит от проницаемости бетона и способности цементного камня и заполнителей вступать в химическую реакцию с агрессивными веществами [4, 5].

«Перенос агрессивной среды в пористой структуре бетона осуществляется по механизму вязкого течения под действием градиента давления и капиллярных сил и по механизму диффузионного переноса при наличии градиента концентрации агрессивного вещества. При этом с уменьшением пористости бетона относительная доля вещества, переносимая по механизму вязкого течения, уменьшается, начинает преобладать диффузионный перенос» [5]. В бетонах с микроскопическими пораами агрессивная среда проникает по диффузионному механизму. На диффузионный перенос оказывает влияние заряд поверхности пор. Так, отрицательный заряд затрудняет диффузию ионов хлоридов и сульфатов.

Различают коррозии бетона следующих видов:

выщелачивание – вымывание гидроксида кальция ( $\text{CaOH}_2$ ) пресной чистой водой, которое ведет к разрушению силикатов и алюминатов цементного камня;

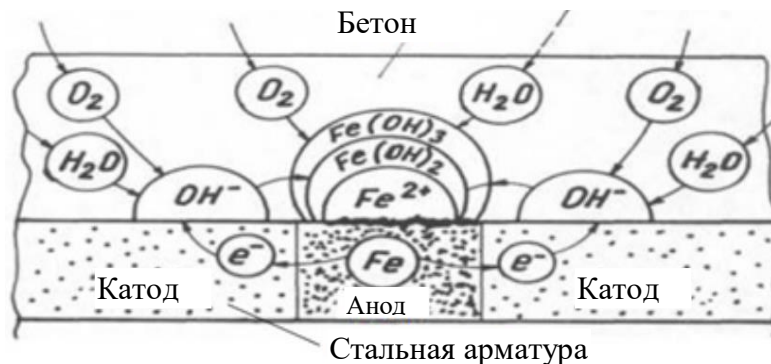
сульфатную – образование гипса и гидросульфалюминатов, увеличивающихся в объеме и разрушающих бетон, вследствие воздействия растворов сульфатов и использования заполнителей, содержащих примеси гипса;

кислотную – при взаимодействии с растворами соляной, уксусной, муравьиной, серной и молочной кислот основные минералы цементного камня разрушаются, образуя соответствующие соли. Частным случаем кислотной коррозии является углекислотная – взаимодействие цементного камня с углекислотой;

биологическую – вызывается тионовыми бактериями в среде, содержащей сероводород, который преобразуется бактериями в серную кислоту. С повышением влажности при благоприятных условиях бетонная поверхность может поражаться грибами, соответственно, снижаются прочностные характеристики бетона и ухудшаются экологические условия. Разрушение же происходит из-за взаимодействия составляющих компонентов бетона и продуктов жизнедеятельности микроорганизмов [5, 6].

Не стоит забывать о коррозии стальной арматуры. В среде с содержанием значительного количества хлорида стальная арматура, которая в бетоне теряет свою защитную пленку, начинает корродировать. Разрушающим для самого бетона является продукт коррозии стальной арматуры – гидроксид железа  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , который имеет значительно больший объем (рисунок) относительно исходной арматуры.

Вокруг стальной арматуры возникает напряжение, и когда достигается предельное значение напряжения, бетон начинает разрушаться [7, 8].



Образование коррозионных микроэлементов в бетоне [7]

Повышать стойкость бетона к агрессивным средам можно несколькими способами.

Правильный подбор вяжущего для бетона, эксплуатирующегося в той или иной агрессивной среде, имеет важное значение. В качестве вяжущих применяются портландцемент, портландцемент с минеральными добавками, шлакопортландцемент, сульфатостойкие и глиноземистые цементы. По данным авторов [9], количество вяжущего должно составлять не менее 300 кг/м<sup>3</sup>.

С помощью рационального подбора зернового состава и пластифицирующих добавок эффективно можно снизить проницаемость бетона и улучшить коррозионную стойкость. Сам по себе цементный камень имеет минимальную проницаемость, а с добавлением мелкого и крупного заполнителя скорость торможения коррозии уменьшается. Крупный заполнитель способствует увеличению диффузии агрессивных сред в структуру бетона, так как контактные поверхности между цементным камнем и заполнителем являются слабыми частями бетонной матрицы. Авторы работы [10] считают, что использование мелкозернистого и порошкового бетона в условиях агрессивных сред наиболее рационально в силу повышенной коррозионной стойкости и минимизированной проницаемости [10–12].

Коррозионную стойкость бетона можно улучшить посредством введения высокоактивных алюмосиликатов и поликарбоксилатных полимеров. Такие реакционноспособные полимеры за счет повышения плотности бетона и гидратационной активности системы позволяют получить бетон с коэффициентом химической стойкости до  $K \geq 0,96$  в средах 5%-го раствора  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и 5%-го раствора  $\text{MgCl}_2$  [13]. Ранее похожее исследование проводилось с применением сразу двух комплексных добавок:

на основе поликарбоксилатных полимеров, модифицированной веществами неорганической природы;

на основе труднорастворимых солей магния, модифицированной диоксидом кремния.

Результатом исследования был бетон с прочной и плотной структурой. В структуре наблюдались труднорастворимые гидросиликат кальция и карбонат магния, повышающие коэффициент коррозионной стойкости до 0,95 и более, в средах 5%-го раствора  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и 5%-го раствора  $\text{MgCl}_2$  [14].

Для улучшения коррозионной стойкости бетона с успехом применяют такие активные минеральные добавки, как зола-уноса [15], микрокремнезем, способные связывать образующийся при гидратации цемента гидроксид кальция в низкоосновные кристаллические соединения.



Важно помнить, что количество таких добавок сверх нормы может ухудшать характеристики бетона. Так, излишнее введение золы-уноса из-за наличия органических остатков может снизить коррозионную стойкость и морозостойкость [4]. В работе [4] был достигнут коэффициент коррозионной стойкости  $K \geq 0,8$  в среде, имитирующей магниезольную (5%-й раствор  $MgCl_2$ ) и кислотную коррозию (0,1 н  $HCl$ ). В работе [15] прочность образцов с добавлением 20 и 30 % активированной золы повысилась от 11 до 21 %. Улучшение прочности объясняется тем, что у золы-уноса возрастает гидравлическая активность, усиливаются в цементной системе эффект микронаполнителя и зародышеобразование гидросиликатных фаз.

Механоактивированные активные минеральные добавки могут использоваться для уменьшения щелочной реакции заполнителя в бетоне с одновременным повышением сульфатостойкости [15]. Отмечается, что механоактивация добавок является экономически целесообразной, так как, например, механоактивация функциональных добавок снижает водопотребность цемента на 40 % и увеличивает активность в 2,5 раза.

Один из способов улучшения коррозионной стойкости бетона – кольматация, которая происходит при взаимодействии цементного камня и агрессивных сред. Кольматация представляет собой процесс проникновения частиц в поры, трещины бетона, а также физического и химического осаждения в нем с последующим торможением процесса коррозии [16, 17]. Поры и пустоты бетона при заполнении компонентами дают улучшенную структуру с меньшей проницаемостью и повышенной морозостойкостью. К примеру, воздействие углекислого газа на бетон при нескольких последовательных физико-химических процессах является источником образования двух кольматантов, малорастворимых в воде:  $CaCO_3$  и  $SiO_2 \cdot nH_2O \cdot CaCO_3$  [16]. Кольматанты способны повысить прочность материала [18].

С использованием модификатора на основе оксифенольных олигомеров, сернокислого натрия в оптимальном количестве можно придать строительным смесям на основе цементных вяжущих фунгицидные свойства [19, 20]. Оптимальное количество варьируется от 0,1 до 1,5 % от массы вяжущего вещества.

Коррозию стальной арматуры можно предотвратить несколькими способами:

- 1) добавлением в состав ингибиторов, способных отсрочить коррозию стальной арматуры;
- 2) покрытием бетона лакокрасочными материалами.

Повышение структурной плотности бетона также может оказать сопротивление воздействию факторов, вызывающих коррозию [5, 20].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бетонные смеси, предназначенные для ремонтных и реконструкционных работ, требуют тщательного подбора сырьевых материалов и внимательного подхода ко многим характеристикам бетона: водонепроницаемости, морозостойкости, адгезии к ремонтному основанию, коэффициенту температурного расширения и особенно коррозионной стойкости в эксплуатируемой среде.

Необходимое количество полимерных добавок и активных минеральных добавок (золы-уноса, микрокремнезема, суперпластификатора, многофункциональной добавки) и рациональный подбор состава заполнителей, наполнителей и других компонентов могут значительно улучшить коррозионную стойкость бетона и стальной арматуры в нем.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Демиденко Е.И., Гурова Е.В. Сухие смеси для ремонтных работ // *Сборник материалов III Международной научно-практической конференции*. Омск: СибАДИ, 2019. С. 361–364.
2. Хританков В.Ф., Пичугин А.П., Смирнова О.Е., Шаталов А.А., Пичугин М.А. Использование наноразмерных добавок в бетонах и строительных растворах для обеспечения адгезии при ремонтных работах // *Наука о Земле: XI Международная конференция «Нанотехнологии в строительстве»*. 2019. С. 131–137.
3. Коровкин М.О., Короткова А.А., Ерошкина Е.А. Ремонтные сухие строительные смеси для восстановления геометрических характеристик железобетонных конструкций // *Образование и наука в современном мире, инновации*. 2020. № 5 (30). С. 122–128.
4. Петрик И.Ю., Губарь В.Н., Корниенко С.В. Коррозионная стойкость бетона с высоким содержанием золы-уноса ТЭС // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2017. № 4 (126). С. 103–107.
5. Розенталь Н.К., Степанова В.Ф., Чехний Г.В. Бетоны высокой коррозионной стойкости и нормирование их характеристик // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2017. № 3-4. С. 14–19.
6. Чеснокова Т.В., Киселев В.А. Оценка влияния различных видов биологической коррозии на бетон // *Актуальные вопросы естествознания: сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. С. 68–70.
7. Suvash C.P., Adewumi J.B. A Review on reinforcement corrosion mechanism and measurement methods in concrete // *Civil Engineering Research Journal*. 2018. No. 5 (3): 555661, pp. 80–90.
8. Karavokyros L., Batis G., Katsiotis N., Tzani E., Beazi-Katsioti M. Durability of reinforced concrete beams under simultaneous flexural load in corrosive environment // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2020. No. 8, pp. 32–45.
9. Бруссер М.И., Подмазова С.А. Проектирование составов тяжелого и мелкозернистого бетона. Пути развития // *Бетон и железобетон*. 2021. № 2 (604). С. 3–7.
10. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Толыпин Д.А. Сравнительная стойкость бетонов с заполнителем различных размеров и без него // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2017. № 11. С. 43–47.
11. Кузьмина В.П. Составы и способы получения сухих строительных смесей // *Сухие строительные смеси*. 2018. № 5. С. 25–30.
12. Алиев С.А., Узаева А.А., Габазов И.А., Гуламов Х.Н. Исследование удобоукладываемости ремонтной модифицированной мелкозернистой смеси // *VIII Международный научный форум молодых ученых, инноваторов, студентов и школьников*. Астрахань: АГАСУ, 2019. С. 181–186.
13. Соловьева В.Я., Степанова И.В., Соловьев Д.А., Ершиков Н.В. Бетон повышенной коррозионной стойкости для транспортного строительства // *Транспортное строительство*. 2019. № 3. С. 20–22.
14. Соловьева В.Я., Масленникова Л.Л., Махмуд Абу-Хасан, Степанова И.В., Ершиков Н.В., Бойкова Т.И., Макаров В.В., Касаткин С.П. Физико-химические основы процессов твердения инновационного бетона для дорожных покрытий // *Естественные и технические науки*. 2017. № 2. С. 150–155.

15. Сафаров К.Б., Степанова В.Ф., Фаликман В.Р. Влияние механоактивированной низкокальциевой золы-уноса на коррозионную стойкость гидротехнических бетонов Рогунской ГЭС // *Строительные материалы*. 2017. № 9. С. 20–24.
16. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Евсяков А.С. К вопросам теории кольматации цементных бетонов // *Информационная среда вуза*. 2017. № 1 (24). С. 403–407.
17. Селяев В.П., Алимов М.Ф., Колотушкин А.В., Кечуткина Е.Л. Влияние наполнителей и пластификаторов на химическое сопротивление цементных композитов водным растворам, содержащим ионы хлора // *Региональная архитектура и строительство*. 2018. № 1 (36). С. 14–22.
18. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Караваев И.В. Жидкостная коррозия бетонов в среде с различной степенью агрессивности // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 4 (63). С. 113–118.
19. Денисова Ю.В., Полуэктова В.А., Строкова В.В. Фунгицидные свойства оксифенольных модификаторов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2016. № 8. С. 13–18.
20. Толстой А.Д. Мелкозернистый бетон повышенной прочности // *Строительные материалы и изделия*. 2020. Т. 3. № 1. С. 39–43.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*ДЖАБАРОВ Амирджон Султонджонович* – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22.

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Джабаров А.С., Белов В.В. Коррозионно-стойкие бетонные смеси ремонтного назначения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 3 (11). С. 6–13.

---

## CORROSION RESISTANCE OF REPAIR BUILDING MIXES

*A.S. Dzhabarov, V.V. Belov*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** In this paper one of the main characteristics of concrete intended for the repair and reconstruction of building structures, corrosion resistance, was considered. It was found out that to increase this characteristic of concrete, it is necessary to take into account a number of necessary requirements for the composition of the mixture. In addition to using heavy concrete for repair work, fine-grained and powdered concrete can also be used, which can improve corrosion resistance.

**Keywords:** corrosion resistance, mineral additives, repair mixtures, aggressive environment, biological corrosion, colmatation.

## REFERENCES

1. Demidenko E.I., Gurova E.V. Dry mixtures for repair work. *Collection of Materials of the III International Scientific and Practical Conference*. 2019, pp. 361–364. (In Russian).
2. Khritankov V.F., Pichugin A.P., Smirnova O.E., Shatalov A.A., Pichugin M.A. The use of nanoscale additives in concrete and building solutions to ensure adhesion during repair work. *Earth Science. XI International Conference «Nanotechnologies in Construction»*. 2019, pp. 131–137. (In Russian).
3. Korovkin M.O., Korotkova A.A., Eroshkina E.A. Repair dry building mixtures for restoring the geometric characteristics of reinforced concrete structures. *Obrazovanie i nauka v sovremennom mire, innovacii*. 2020. No. 5 (30), pp. 122–128. (In Russian).
4. Petrik I.Yu., Gubar V.N., Kornienko S.V. Corrosion resistance of concrete with a high content of ash-fly ash TPP. *Vestnik Donbasskoy nacional'noy akademii stroitel'stva i arhitekturi*. 2017. No. 4 (126), pp. 103–107. (In Russian).
5. Rosenthal N.K., Stepanova V.F., Chekhniy G.V. High corrosion resistance concretes and normalization of their characteristics. *Stroitel'nie materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka*. 2017. No. 3-4, pp. 14–19. (In Russian).
6. Chesnokova T.V., Kiselev V.A. Assessment of the impact of various types of biological corrosion on concrete. *Topical Issues of Natural Science. Collection of Materials of the III All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*. 2018, pp. 68–70. (In Russian).
7. Suvash C.P., Adewumi J.B. A Review on reinforcement corrosion mechanism and measurement methods in concrete. *Civil Engineering Research Journal*. 2018. No. 5 (3): 555661, pp. 80–90.
8. Karavokyros L., Batis G., Katsiotis N., Tzanis E., Beazi-Katsioti M. Durability of reinforced concrete beams under simultaneous flexural load in corrosive environment. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2020. No. 8, pp. 32–45.
9. Brousser M.I., Podmazova S.A. Design of heavy and fine concrete compositions. Development routes. *Beton i zhelezobeton*. 2021. No. 2 (604), pp. 3–7. (In Russian).
10. Rakhimbayev Sh.M., Tolykina N.M., Tolykin D.A. Comparative resistance of concrete with aggregate of various sizes and without it. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2017. No. 11, pp. 43–47. (In Russian).
11. Kuzmina V.P. Compositions and methods of producing dry building mixtures. *Suchye stroitel'nye smesy*. 2018. No. 5, pp. 25–30. (In Russian).
12. Aliyev S.A., Uzaeva A.A., Gabazov I.A., Gulamov Kh.N. Study of the convenience of repair modified fine-grained mixture. *VIII International Scientific Forum of Young Scientists, Innovators, Students and Schoolchildren*. 2019, pp. 181–186. (In Russian).
13. Solovyova V.Ya., Stepanova I.V., Solovyov D.A., Yershikov N.V. Concrete of increased corrosion resistance for transport construction. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2019. No. 3, pp. 20–22. (In Russian).
14. Solovyova V.Ya., Maslennikova L.L., Mahmoud Abu-Hasan, Stepanova I.V., Yershikov N.V., Boykova T.I., Makarov V.V., Kasatkin S.P. Physico-chemical foundations of hardening processes of innovative concrete for road surfaces. *Estestvennyye i technicheskyye nauky*. 2017. No. 2, pp. 150–155. (In Russian).
15. Safarov K.B., Stepanova V.F., Falikman V.R. Influence of mechanically activated low-calcium fly ash on corrosion resistance of hydraulic concrete of rogun HPP. *Stroitel'nyye materialy*. 2017. No. 9, pp. 20–24. (In Russian).

16. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. On the theory of colmatation of cement concrete. *Informatsionnaya sreda vuza*. 2017. No. 1 (24), pp. 403–407. (In Russian).
17. Selyaev V.P., Alimov M.F., Kolotushkin A.V., Kechutkina E.L. Influence of fillers and plasticizers on chemical resistance of cement composites to aqueous solutions containing chlorine ions. *Regionalaya architectura i stroitel'stvo*. 2018. No. 1 (36), pp. 14–22. (In Russian).
18. Fedosov S.V., Rummyantseva V.E., Konovalova V.S., Karavaev I.V. Liquid corrosion of concrete in an environment with varying degrees of aggressiveness. *Vestnik grazhdanskich inzhenerov*. 2017. No. 4 (63), pp. 113–118. (In Russian).
19. Denisova Yu.V., Poluektova V.A., Strokova V.V. Fungicidal properties of oxyphenol modifiers. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2016. No. 8, pp. 13–18. (In Russian).
20. Tolstoy A.D. Fine-grained concrete of increased strength. *Stroitelnye materialy i izdeliya*. 2020. Vol. 3. No. 1, pp. 39–43. (In Russian).

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*DZHABAROV Amirdzhon Sultondzhonovich* – Postgraduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

*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 Production, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

### CITATION FOR AN ARTICLE

Dzhabarov A.S., Belov V.V. Corrosion resistance of repair building mixes // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 3 (11), pp. 6–13.

УДК 331.45:693

## АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ НОВОВВЕДЕНИЙ В ПРАВИЛАХ ПО ОХРАНЕ ТРУДА ПРИ РАБОТЕ НА ВЫСОТЕ

*А.М. Пузырев, Л.В. Козырева*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Пузырев А.М., Козырева Л.В., 2021

**Аннотация.** В статье рассмотрены Правила по охране труда при работе на высоте, утвержденные Приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 16.11.2020 № 782н: выявлены основные изменения в Правилах по охране труда при работе на высоте; описаны требования к работникам, допускаемым к производству на высоте; указан возрастной и образовательный ценз при установлении групп безопасности; рассмотрено документальное оформление работ на высоте. Сделаны выводы в целом об изменениях, которым были подвергнуты Правила по охране труда при работе на высоте. Статья может быть полезна широкому кругу специалистов по охране труда в качестве аналитического материала.

**Ключевые слова:** системы обеспечения, безопасность, работа на высоте, группы безопасности при работе на высоте, наряд-допуск, высотные работы, профессиональные риски.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2021-13-20**

С 1 января 2021 г. в Российской Федерации вступили в действие новые Правила по охране труда при работе на высоте, утвержденные Приказом Минтруда России от 16 ноября 2020 г. № 782н (далее – Правила № 782н), которые устанавливают государственные нормативные требования по охране труда и регулируют порядок действий работодателя и работника при организации и проведении работ на высоте. Ранее действующие Правила № 155н являлись, мягко говоря, несовершенным, явно недоработанным и не до конца продуманным нормативным правовым актом, который вносил путаницу и в вопросы обучения и аттестации специалистов и персонала, организовывающих и выполняющих работы на высоте, и в разработку и выполнение организационно-технических мероприятий на местах и участках производства этих работ [1–3].

В Правилах № 782н были устранены многие неточности и двусмысленности в понимании требований, которыми изобиливали старые Правила № 155н, а требования безопасности при работе на высоте приведены в соответствие с нормами технических регламентов Таможенного союза и другими нормативными правовыми актами Российской Федерации.

Важными новшествами Правил № 782н являются четкое определение и разграничение видов работ на высоте, на которые нужно оформлять наряд-допуск. Рассмотрим эти требования чуть подробнее и внимательнее.

На работы с допустимым минимальным риском больше не нужно оформлять наряд-допуск. К таким работам относят:

выполняемые постоянным квалифицированным составом работников-исполнителей;

периодические повторяющиеся работы, которые характеризуются постоянством (однообразием) места, условий и специфики работ, средств коллективной защиты и являются частью технологического процесса.

*Пример 1.* Работой с допустимым минимальным риском можно считать работу штукатуров и отделочников внутренних помещений здания. Они работают на инвентарных проверенных подмостях с применением средств коллективной защиты, т. е. оснащенных защитными ограждениями. Эти работы выполняются по технологическим картам и являются повседневными и привычными для исполнителей. Разрабатывать для них план производства работ на высоте не требуется. Квалификационная группа работникам не присваивается.

Если же в работе присутствует высокий риск падения с высоты, специалистам необходимо присваивать соответствующую группу работ на высоте и выдавать удостоверение по установленной форме (см. приложение 3 Правил № 782н).

*Пример 2.* Электромонтер линейных сооружений связи на своем закрепленном (шкафном) районе устраняет обрыв или короткое замыкание на линии. Это обычная работа электромонтера, входящая в содержание его производственной инструкции. Но если он будет выполнять работы с высоким риском, например в пролете пересечения линии связи

с линией электропередачи или в зоне действия воздушной линии, то нужно оформлять наряд-допуск и присваивать электромонтеру группу работы на высоте.

Правилами № 782н конкретизированы виды работ на высоте, перед выполнением которых необходимо выдавать наряд-допуск:

работы на высоте без применения средств подмащивания, выполняемые на высоте 5 м и более;

работы, выполняемые на площадках на расстоянии менее 2 м и от неогражденных (при отсутствии защитных ограждений) перепадов по высоте более 5 м либо при высоте ограждений, составляющей менее 1,1 м.

В общих положениях Правил № 782н содержатся требования к проведению оценки профессиональных рисков работников при выполнении работ на высоте как составной части системы управления охраной труда (СУОТ) организации. С 2021 г. работодатель обязан осуществлять расчет и оценку рисков падения с высоты в соответствии с требованиями п. 4 Правил № 782н [1].

Представляется, что оценка рисков позволит выявить, какой риск падения с высоты существует – высокий или низкий (допустимый минимальный риск). Риск падения влияет на необходимость оформления нарядов-допусков при проведении работ на высоте. В связи со всем вышесказанным работодатель может и должен максимально снижать риски, обусловленные возможным падением работника с высоты [3].

Таким образом, организация работы на высоте по Правилам № 782н и присвоение квалификационной группы работникам, выполняющим эти работы, находится теперь в зависимости от риска падения, рассчитанного и установленного в ходе оценки профессиональных рисков. Важным также является то, что больше нет градации работ на высоте «с применением средств подмащивания» и «без применения средств подмащивания». Поэтому организациям, осуществляющим работы на высоте, необходимо провести оценку рисков в рамках СУОТ.

Если оценка рисков на предприятии не проводилась, а работы на высоте необходимы, работодатель должен организовать и осуществить меры безопасности для всех работ на высоте как с высоким риском, т. е. выдавать наряд-допуск и разрабатывать план производства работ на высоте. Следует обратить внимание, что при выполнении работ на высоте выбор средств коллективной защиты, систем обеспечения безопасности должен быть обоснован результатами оценки рисков и задокументирован в расчете риска.

Различаются, согласно Правилам № 782н, и мероприятия по обеспечению безопасности труда в зависимости от риска падения с высоты (табл. 1).

Однако следует отметить, что включение в Правила № 782н зависимости разработки мероприятий по обеспечению безопасности работ на высоте от расчетов уровней профессиональных рисков поставило перед работодателями серьезную проблему. Причем Правила как бы авансировали ее.

Дело в том, что методика проведения оценки профессиональных рисков еще не утверждена. Поэтому работодателям пока предлагается проводить оценку рисков по имеющимся документам:

ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 «Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент риска. Методы оценки риска», который содержит более 35 методов расчета и оценки рисков;

Методикам для определения профессиональных рисков, рекомендованным Международной организацией труда (матричный метод оценки рисков).

Таблица 1

## Мероприятия по обеспечению безопасности труда

Уровень риска	Требования	Выполнение
Работа с допустимым минимальным риском падения с высоты	Выдача наряда-допуска	Не требуется, работы проводятся по технологической карте
	Ответственный руководитель работ	Не назначается
	Проведение целевого инструктажа перед работой	Не проводится
	Запись в журнале учета работ по наряду-допуску	Не требуется
	Подготовка рабочего места и допуск к работе	Работы проводятся исполнителями самостоятельно
Работа с высоким риском падения с высоты	Выдача наряда-допуска	Требуется, работы проводятся по плану производства работ на высоте
	Ответственный руководитель работ	Назначается, он обязан провести целевой инструктаж по безопасности труда с каждым членом бригады
	Регистрация наряда-допуска в журнале	В журнал учета работ заносится наряд-допуск
	Подготовка рабочего места и допуск к работе	Проводят ответственный руководитель и ответственный исполнитель работ

Выбор методик остается за работодателем и зависит от задач, которые необходимо решать. Есть простые, сложные и сверхсложные методы анализа и расчета профессиональных рисков.

В Российской Федерации пока действует Приказ Минтруда России от 21 марта 2019 г. № 77 «Об утверждении методических рекомендаций по проверке создания и обеспечения функционирования системы управления охраной труда». В соответствии с этим документом после процедуры идентификации опасностей и оценки рисков (в том числе и рисков падения работника с высоты) у работодателя должны быть разработаны:

реестр опасностей,

реестр профессиональных рисков,

карта профессиональных рисков на каждое рабочее место.

Как показывает практика, провести полноценную оценку профессиональных рисков силами штатного специалиста по охране труда в организации довольно сложно. Работодателю необходимо сформировать комиссию или оценочную команду из специалистов по охране труда, промышленной безопасности, отдельным технологическим



процессам, знакомых с методиками оценки профессиональных рисков. Эта проблема является весьма актуальной и серьезной в строительных организациях, у которых, например, несколько объектов, большое количество непостоянных рабочих мест на высоте, разные технологические процессы. Получается, что для исполнения требований новых Правил фактически необходимо проводить расчет профессиональных рисков для каждого нового объекта строительства. В связи с этим можно предположить, что строители пойдут по упрощенному, формальному пути, а именно разработают примитивный, обобщенный расчет рисков в рамках СУОТ только на случай проверки контролирующими органами, а мастера и прорабы о расчетах и не узнают [3, 4].

Правила № 782н теперь требуют обязательного назначения ответственных руководителей работ во всех случаях выполнения работ на высоте по наряду-допуску. Для них работодатель должен организовать специальную подготовку в учебных центрах с последующим присвоением третьей квалификационной группы работы на высоте.

В новых Правилах наконец появилось четкое разграничение, кому можно присваивать первую, вторую и третью группы и в каких случаях один работник может иметь сразу несколько групп работы на высоте. Так, работнику с третьей группой, который собирается непосредственно выполнять работы на высоте, требуется присваивать дополнительно:

группу 1 – для членов бригады;

группу 2 – для бригадира (ответственного исполнителя работ).

Ранее считалось, что если у сотрудника есть третья группа, он может сам работать и устранять повреждения в качестве члена бригады или мастера и ему не нужно было дополнительно получать первую или вторую группу на работы на высоте.

Порядок обучения и проверки знаний работников по Правилам № 782н представлен в табл. 2.

Таблица 2

Порядок обучения и проверки знаний работников

Организация работ	Виды работ и группы по безопасности работ на высоте		
	Работа с допустимым минимальным риском падения с высоты	Работа с высоким риском падения с высоты (группы 1 и 2)	Работа с высоким риском падения с высоты (группа 3)
Место проведения первичного обучения	Учебный центр	Учебный центр	
Место проведения периодического обучения	У работодателя		
Периодичность обучения	Устанавливает работодатель	Не реже одного раза в 3 года	Не реже одного раза в 5 лет
Формат обучения	Очно		Допускается проведение в заочной форме или с применением дистанционных технологий

Что касается вопросов обучения по безопасности труда работников, допускаемых к выполнению работ на высоте, то Правила № 782н также содержат не совсем понятные определения и трактовки требований. Например, в п. 3 Правил № 782н указано, что к работам на высоте относятся и те, при которых сотрудниками осуществляется подъем на высоту более 5 м или спуск с высоты более 5 м по лестнице, угол наклона которой к горизонтальной поверхности составляет более 75 градусов; п. 11 Правил № 782н требует, чтобы специалисты, выполняющие работу на высоте, имели квалификацию, соответствующую характеру выполняемой работы. Уровень квалификации должен подтверждаться документом о профессиональном образовании (обучении) и (или) квалификации [1, 5]. Подобную работу ежедневно выполняет машинист башенного крана, поднимаясь в кабину. Возникает ряд вопросов: каким образом и где его обучать безопасности выполнения работ на высоте, документ о каком профессиональном образовании ему выдавать?

Третий раздел Правил № 782н дополнен требованиями к содержанию плана производства на высоте, который в старых правилах содержался в приложении. Существенным изменением в этом разделе является отмена запрета на проведение работ на высоте:

на открытых местах при скорости ветра 15 м/с и более;

при грозе и тумане, исключаящими видимость в пределах фронта работ, а также при гололеде с обледенелых конструкций и в случаях нарастания стенки гололеда на проводах, оборудовании, инженерных конструкциях (в том числе на ЛЭП), деревьях;

при монтаже (демонтаже) конструкций большой парусности при скорости ветра 10 м/с и более.

В Правилах № 782н выполнение вышеуказанных работ разрешено при условии оформления наряда-допуска с обязательным указанием в нем соответствующих мероприятий по безопасности труда. Следовательно, ответственность за организацию и соблюдение мероприятий по безопасности работ на высоте в особых условиях возлагается на работодателя, который обязан предусмотреть все меры по снижению риска. Однако вызывает большие сомнения способность включения в нормативный правовой акт такого «европейского подхода» к обеспечению безопасности работ на высоте, когда в Российской Федерации до сих пор на законодательном уровне не определена стоимость жизни работника или третьего лица, практически система страхования ответственности и судебная система нормально не функционируют.

Таким образом, новые Правила по охране труда при работе на высоте содержат ряд двусмысленных и не в полной мере доработанных требований и положений, что поставит в затруднительное положение руководителей и специалистов предприятий при практической организации безопасности этих работ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Об утверждении Правил по охране труда при работе на высоте: Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 16.11.2020 № 782н. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012160036> (дата обращения: 20.04.2021).
2. Об утверждении Правил по охране труда при работе на высоте: Приказ Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 28.03.2014 № 155н. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_169008](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_169008) (дата обращения: 20.04.2021).

3. Пузырев А.М., Козырева Л.В., Мартемьянов В.А., Филиппова Н.А. Актуальные вопросы нормативно-правовой базы в области организации и проведения работ на высоте // *Современные технологии и инновации: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции*. Тверь: ТвГТУ, 2020. С. 161–167.
4. Глебова Е.В., Фомин Э.А., Иванова М.В. Порядок допуска подрядных организаций к выполнению работ на строительной площадке // *Безопасность труда в промышленности*. 2021. № 2. С. 24–28.
5. Об утверждении порядка обучения по охране труда и проверки знаний требований по охране труда работников организаций: Постановление Министерства труда и социального развития Российской Федерации и Министерства образования Российской Федерации от 13.01.2003 № 1/29. URL: <https://base.garant.ru/185522/> (дата обращения: 05.04.2021).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*ПУЗЫРЕВ Алексей Михайлович* – старший преподаватель кафедры безопасности жизнедеятельности и экологии, факультет природопользования и инженерной экологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: [Puzyrev-am@mail.ru](mailto:Puzyrev-am@mail.ru)

*КОЗЫРЕВА Лариса Викторовна* – д-р техн. наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и экологии, факультет природопользования и инженерной экологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: [Larisa.v.k.176@mail.ru](mailto:Larisa.v.k.176@mail.ru)

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Пузырев А.М., Козырева Л.В. Актуальные вопросы нововведений в правилах по охране труда при работе на высоте // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 3 (11). С. 13–20.

---

### URGENT ISSUES OF INNOVATIONS IN WORK AT HEIGHT SAFETY REGULATIONS

*A.M. Puzyrev, L.V. Kozyreva*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article analysis Work at Height Safety Regulations approved by order № 782n dtd. November 16, 2020 of the Russian Ministry of Labour and Social Protection: it deals with the main the changes in the Russian Work at Height Safety Regulations: the requirements for employees, allowed to work at height are given, age and educational qualifications for safety groups are specified, the documentation for work at height, including the forms of documents is discussed. The conclusions in whole about the changes of the Regulations of the Occupational Safety for working at height are drawn. The article can be useful to a wide range of occupational safety specialists as analytical tools.

**Keywords:** safety system for working at height, safety groups for working at height, permit for working at height, professional risks.

**REFERENCES**

1. About the approval of the rules on labor protection at work at height: Order of the Ministry of labour and social protection of the Russian Federation of November 16, 2020 No. 782n. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202012160036> (date of access: 20.04.2021). (In Russian).
2. About the approval of the rules on labor protection at work at height: Order of the Ministry of labour and social protection of the Russian Federation of March 28, 2014 № 155n. URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_169008](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_169008) (date of access: 20.04.2021). (In Russian).
3. Puzyrev A.M., Kozyreva L.V., Martemyanov V.A., Filippova N.A. Urgent issues for the field of organization and performance of work at height. *Modern Technologies and Innovations: Materials of IV All-Russia Scientific and Practical Conference*. Tver: TvSTU, 2020, pp. 161–167. (In Russian).
4. Glebova E.V., Fomin E.A., Ivanova M.V. Procedure for admittance of the contractor companies to perform the work at the construction site. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2021. No. 2, pp. 24–28. (In Russian).
5. On approval of the procedure for training on labor protection and testing the knowledge of the requirements for labor protection of employees of organizations: Decree of the Ministry of labour and social development of the Russian Federation and Ministry of education of the Russian Federation of January 13, 2003. № 1/29. URL: <https://base.garant.ru/185522/> (date of access: 05.04.2021). (In Russian).

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*PUZYREV* *Aleksey Mikhaylovich* – Senior Lecturer of the Department of Life Safety and Ecology, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Puzyrev-am@mail.ru

*KOZYREVA* *Larisa Viktorovna* – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Life Safety and Ecology, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Larisa.v.k.176@mail.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Puzyrev A.M., Kozyreva L.V. Urgent issues of innovations in work at height safety regulations // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 3 (11), pp. 13–20.

УДК 712.253.011

**СОЦИОКУЛЬТУРНЫЙ АСПЕКТ ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО РАЗВИТИЯ  
МАЛЫХ ИСТОРИЧЕСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ ТВЕРСКОГО РЕГИОНА*****В.В. Федоров, М.В. Федоров****Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Федоров В.В., Федоров М.В., 2021

**Аннотация.** Акцентируются различия социокультурного развития больших и малых городов, проявляющиеся в активности массового сознания. Показана актуальность выбора оператора особенностей места проживания и деятельности, когда решающими факторами становятся масштаб населенных мест, их соотношение в пространстве и порождаемые этими обстоятельствами характерные черты. Ухудшение эпидемиологической ситуации, расширение возможностей цифровой экономики, совершенствование дорожно-транспортной инфраструктуры ставят на повестку дня задачи более полного вовлечения малых городов в активную жизнь региона и страны. Отмечается, что малые города и исторические поселения получают дополнительные возможности реализации своего потенциала. Юридически муниципальные власти имеют необходимые права, но присущее им экономическое и социокультурное положение не позволяет реализовать эти возможности в необходимой мере. Предлагается типологическое сравнение социокультурных характеристик большого и малого города. Рассматривается роль малых исторических поселений в развитии Тверского региона.

**Ключевые слова:** малый исторический город, массовая культура, реконструкция застройки, градостроительное развитие, переустройство прибрежных территорий.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2021-21-26**

В центре внимания современной градостроительной науки традиционно находятся большие образования – мегаполисы, агломерации, системы расселения. Однако даже в наиболее урбанизированных странах значительная часть населения по-прежнему проживает в малых городах и поселках. Это обуславливает актуальность проблем развития и выживания исторических поселений, в которых разрушается инфраструктура, сокращаются трудовые места и население. Стоит отметить, что даже в Градостроительном кодексе Российской Федерации не существует закрепленной законом границы между понятиями «большой город» и «малый город». Разводя два нечетких множества – «города большие» и «города малые», мы тем самым пытаемся очертить границы концептуального пространства, в котором сглаживаются нестыковки логики научного (социологического, культурологического, социально-психологического) анализа и реалий действительности. Если бы названные феномены не были так поляризованы в самых различных отношениях (таблица), то отсутствовали бы мощные социокультурные, психологические и экономические факторы, определяющие актуальные масштабы урбанизации, миграции и других примет современности.

Очевидные различия социокультурного развития больших и малых городов проявляются, помимо прочего, в активности массового сознания [1], которое в состоянии реагировать на калейдоскоп событий и перемен в основном на эмоциональном уровне, уровне настроений. Осмысление происходящего и формирование рационально-логических стереотипов, убеждений и традиций в малых городах (количественно ограниченных

социальных группах) идут с временным лагом [2, с. 137]. Однако это запаздывание имеет и свои плюсы, например повышенную способность к сопротивлению внешним воздействиям, самовосстановлению или принудительному восстановлению системы [3, с. 10].

#### Характерные социокультурные черты большого и малого города

Параметры поведения/среды	Большой город	Малый город
Отношение ко времени и пространству	Тревога за будущее; концентрация интереса на локальном пространстве проживания	Готовность жить сегодняшним днем; интерес к любым трансформациям городской среды проживания
Средний возраст населения	Возраст населения меньше, чем средний по региону и стране; более высокая продолжительность жизни	Высокие показатели смертности; высокая продолжительность жизни преимущественно женской части населения
Мотивация достижения жизненных целей	Очень высокая мотивация жизненного успеха в группе мигрантов и у молодых людей; предпочтение – управленческий тип карьеры в любой сфере	Низкая мотивация в возрастных группах; выраженное стремление покинуть малое поселение у молодежи; профессиональные предпочтения – карьера специалиста
Готовность к риску	Очень высокая готовность к риску в самых различных стратах населения большого города	Низкая готовность к риску; преобладающая готовность подчиниться обстоятельствам
Квалификация специалистов и руководителей	Высокий уровень квалификации; руководители, как правило, не являются специалистами в профессиональной сфере	Достаточно высокий уровень квалификации специалистов; выраженный дефицит претендентов на руководящие роли
Отношение к конфликтам	Конфликты в социуме и трудовой сфере рассматриваются как естественное состояние	Конфликты в любой сфере рассматриваются как крайне нежелательное явление
Экономическая жизнь	Высокие показатели на национальном и региональном уровне, низкая безработица; представленность всех сфер деятельности (исключая сельскохозяйственное производство); развитая сфера обслуживания; преобладание наемного труда	Высокая безработица; отсутствие выбора сферы профессиональной деятельности (возможный вариант – моногород); сфера социокультурного обслуживания не развита; личное и подсобное хозяйства носят массовый характер
Архитектурно-ландшафтная среда	Различные типы застройки; обустроенная транспортная, инженерная и социальная инфраструктура; исторический центр – обихоженная достопримечательность	Застройка малоэтажная, исторический центр пространственно не оформлен; деградировавшая рекреационная инфраструктура береговой зоны водоемов и водотоков; плохое состояние инфраструктуры и достопримечательностей
Трансформация массового сознания и устойчивость социума	Адекватное осмысление происходящих в мире и обществе изменений согласно общечивилизационным нормам	Принятие происходящих изменений реализуется с временным отставанием; повышенная способность к сопротивлению внешним воздействиям и самовосстановлению

В городе вместо бытийного измерения существования мы оказываемся перед сложным архитектурно-ландшафтным (а теперь еще и цифровым, виртуальным) образом среды предметно-пространственного окружения. По-видимому, развитые сообщества сейчас оказались в точке топологической бифуркации – выбора оператора особенностей места проживания и деятельности. Причем дело не ограничивается параметрами его ландшафта, географии и топографии. При таком взгляде решающими факторами становятся также масштаб населенных мест, их соотношение в пространстве и порождаемые этими обстоятельствами характерные черты социального бытия.

Опережающее развитие сверхкрупных городов создает массу преимуществ (социокультурного, экономического, демографического плана и др.). Однако неизбежно увеличиваются проблемы экологического, социального, национального характера и пр. [4–6]. Ухудшение эпидемиологической ситуации (и это не только из-за COVID-19), расширение возможностей цифровой экономики (учебы и работы в удаленном доступе), совершенствование дорожно-транспортной инфраструктуры ставят на повестку дня задачи более полного вовлечения малых городов в активную жизнь страны. В обстоятельствах ограничения международного туризма усиливается интерес к внутреннему туризму, путешествиям по регионам, малые города и исторические поселения получают дополнительные возможности реализации своего потенциала.

Система социальной стратификации в малых поселениях определяется не политическими и экономическими, а социально-территориальными характеристиками (знакомые, родственники, земляки и пр.). Молодые люди ориентированы преимущественно на поиск возможности покинуть малое поселение, кто постарше – на самовыживание, самообеспечение и самовоспроизводство, при этом используются очень специфические механизмы адаптации к любым вариантам социально-экономических изменений [7, 8].

В развитых странах мира многие малые города прошли этап формализации и создания условий обеспечения мобильности социальной среды, обрели особые формально-правовые городские структуры. Схожий процесс намечается и в России: юридически муниципальные власти имеют необходимые права, но не могут реализовать их в необходимой мере из-за экономического и социокультурного положения, несмотря на то, что по мере становления IT-среды появляются все новые варианты вхождения в общекультурное и социально-экономическое пространство.

Рассмотренные социокультурные черты, свойственные большим и малым городам, наряду с экономическими факторами, также вносят свою лепту в процессы реконструктивного и градостроительного развития малых городов и исторических поселений Тверской области. После изменения федерального законодательства (2010 г.) **статус исторических поселений федерального значения** в Тверском регионе имеют только три города: Осташков, Торопец и Торжок. В соответствии с законом региональные органы власти имеют право пополнять этот список, но за минувшие 10 лет так и не появились подзаконные акты, определяющие критерии и саму процедуру. Де-факто в области неофициально продолжают выделять по этому разряду еще десять поселений (плюс региональный центр), в отношении которых реализуются меры (пусть и очень скудные) по выравниванию бюджетной обеспеченности, сохранению/улучшению городской среды и пр. Эти исторические поселения (Бежецк, Белый, Весьегонск, Вышний Волочек, Зубцов, Калязин, Кашин, Красный Холм, Ржев, Старица) участвуют в конкурсах проектов регионального и республиканского масштаба по созданию комфортной и безопасной городской среды. На их территории находится большинство объектов культурного

наследия и достопримечательные места, имеющие особую социально-культурную значимость в сохранении самобытности населения и среды проживания [9, 10].

### ВЫВОДЫ

1. Статус крупного города потенциально предполагает наличие условий самореализации каждого жителя. Только в крупном городе существуют возможности сложно дифференцированной профессиональной деятельности. В современной России малый город не располагает подобными возможностями в силу социокультурных, экономических, демографических и других обстоятельств.

2. Малые исторические поселения Тверского региона имеют очень ограниченную собственную нишу (туризм и малый бизнес) и не располагают реальными способами привлечения новых жителей, туристов, высокопрофессиональных кадров, инвесторов и пр. В этой ситуации исключительно важен вариант реконструктивно-градостроительного развития преимущественно прибрежных зон (т. е. благоустройства и пластики центральных территорий поселения, примыкающих к водоемам и водотокам).

3. Участвуя в конкурсах создания безопасной и комфортной среды, малые исторические поселения Тверской области получают реальную возможность разработки локальных стратегий совершенствования городской среды. Реконструкция береговых территорий и примыкающей улично-дорожной инфраструктуры не требует масштабных капиталовложений и может выполняться небольшими этапами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котельников Г.А., Поддубный Н.В. Современное российское общество: феноменология нестабильности // *Синергетическая парадигма: человек и общество в условиях нестабильности*. М.: Прогресс-Традиция, 2003. С. 167–181.
2. Социальная психология в современном мире / под ред. Г.М. Андреевой, А.И. Донцова. М.: Аспект Пресс, 2002. 335 с.
3. Маслов Н.В. Градостроительная экология. М.: Высшая школа, 2002. 284 с.
4. Бехтель Э.Е., Бехтель А.Э. Контекстуальное опознание. СПб.: Питер, 2005. 336 с.
5. Зеленов Л.А. Социология города. М.: ВЛАДОС, 2000. 192 с.
6. Степанов А.В. Архитектура и психология. М.: Стойиздат, 1993. 295 с.
7. Савчук В.В. Топологическая рефлексия. М.: Канон+, 2012. 416 с.
8. Архитектурная композиция садов и парков / под общ. ред. В.П. Вергунова. М.: Стройиздат, 1980. 254 с.
9. Пляскина О.А., Кудряшова Е.В., Федоров В.В. Кадастр прибрежных территорий города и формирование экологического каркаса // *Инновационные исследования в современном мире*. Уфа: НИЦ «Вестник науки», 2020. С. 202–209.
10. Кудряшова У.И., Пляскина О.А., Федоров В.В. Кадастр и маркетинг имиджа прибрежных территорий города // *Инновационные исследования в современном мире*. Уфа: НИЦ «Вестник науки», 2020. С. 196–202.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ФЕДОРОВ Виктор Владимирович** – д-р культурологии, профессор кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vvf322@yandex.ru



ФЕДОРОВ Михаил Викторович – доцент кафедры менеджмента, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vvf322@yandex.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Федоров В.В., Федоров М.В. Социокультурный аспект градостроительного развития малых исторических поселений Тверского региона // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 3 (11). С. 21–26.

---

### SOCIO-CULTURAL ASPECT OF URBAN DEVELOPMENT SMALL HISTORICAL SETTLEMENTS OF THE TVER REGION

*V.V. Fedorov, M.V. Fedorov*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The differences in the socio-cultural development of large and small cities, which are reflected in the activity of mass consciousness, are emphasized. The relevance of the choice of the operator of the features of the place of residence and activity is shown, when the decisive factor is the scale of populated places, their correlation in the open space and the characteristic features generated by these circumstances. The increasing complexity of the epidemiological situation, the expansion of the digital economy, and the improvement of the road transport infrastructure put on the agenda the tasks of more fully involving small cities in the active life of the region and the country. It is noted that small towns and historical settlements receive additional opportunities to realize their potential. Legally, the municipal authorities have the necessary rights, but their economic and socio-cultural situation does not allow them to be implemented to the necessary extent. A typological comparison of the socio-cultural characteristics of a large and small city is proposed. The role of small historical settlements in the development of the Tver region is considered.

**Keywords:** small historical city, mass culture, reconstruction of buildings, urban development, reconstruction of coastal territories.

#### REFERENCES

1. Kotelnikov G.A., Poddubny N.V. In modern Russian society: the phenomenology of instability. *Synergetic paradigm: man and society in conditions of instability*. M.: Progress-Traditsiya, 2003, pp. 167–181.
2. Social psychology in the modern world [Social psychology in the modern world] / ed. G.M. Andreeva, A.I. Dontsova]. M.: Aspekt Press, 2002. 335 p.
3. Maslov N.V. Gradostroitel'naya ekologiya [Urban ecology]. M.: Vysshaya shkola, 2002. 284 p.
4. Buchtel E.E., Bechtel A.E. Kontekstual'noe opoznanie [Contextual identification]. St. Petersburg: Piter, 2005. 336 p.
5. Zelenov L.A. Sociologiya goroda [Sociology of the city]. M.: VLADOS, 2000. 192 p.
6. Stepanov A.V. Arhitektura i psihologiya [Architecture and psychology]. M.: Stoizdat, 1993. 295 p.

7. Savchuk V.V. Topologicheskaya refleksiya [Topological reflection]. M.: Kanon+, 2012. 416 p.
8. Arhitekturnaya kompozitsiya sadov i parkov [Architectural composition of gardens and parks] / gen. ed. V.P. Vergunov. M.: Stroyizdat, 1980. 254 p.
9. Plyaskina O.A., Kudryashova E.V., Fedorov V.V. Cadastre of the coastal territories of the city and the formation of the ecological framework. *Innovative Research in the Modern World*. Ufa: RC «Bulletin of Science», 2020, pp. 202–209.
10. Kudryashova U.I., Plyaskina O.A., Fedorov V.V. Cadastre and marketing of the image of the coastal territories of the city. *Innovative Research in the Modern World*. Ufa: RC «Bulletin of Science», 2020, pp. 196–202.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*FEDOROV Viktor Vladimirovich* – Doctor of Cultural Sciences, Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vvf322@yandex.ru

*FEDOROV Mikhail Viktorovich* – Associate Professor of the Department of Management, Tver State Technical University, 22, embankment Af. Nikitin, Tver, 170026. E-mail: vvf322@yandex.ru

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Fedorov V.V., Fedorov M.V. Socio-cultural aspect of urban development small historical settlements of the Tver region // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 3 (11), pp. 21–26.

УДК 624.046.3

### ВЫПУЧИВАНИЕ СТЕРЖНЯ ИЗ СТАЛИ 45 ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОСЕВОГО СЖАТИЯ ПРИ УПРУГОЙ РАБОТЕ МАТЕРИАЛА

*С.В. Черемных*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Черемных С.В., 2021

**Аннотация.** Исследуется проблема потери устойчивости изолированного шарнирно подкрепленного стержня тонкостенного кругового поперечного сечения при комбинированном нагружении осевой сжимающей силой и крутящим моментом. Задача решается в бифуркационной постановке при упругой работе материала. Получены уравнения для вычисления критической интенсивности напряжений в зависимости от гибкости тонкостенного стержня при реализации пропорциональных процессов комбинированного докритического нагружения осевой сжимающей силой и крутящим моментом в плоскости  $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_3$  девиаторного пространства деформаций А.А. Ильюшина. Разработаны алгоритмы и программы решения задачи бифуркации тонкостенного стержня кругового поперечного сечения при комбинированном нагружении осевой сжимающей силой и крутящим моментом как при упругой, так и при упругопластической работе материала. Получено уравнение для вычисления критической нагрузки в упругой задаче о

выпучивании тонкостенной круговой цилиндрической оболочки при осевом сжатии. С целью проверки полученных уравнений решена модельная упругая задача.

**Ключевые слова:** стержень, докритическое нагружение, деформирование материала, бифуркация, крутящий момент, неконсервативная система.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2021-26-35**

## ВВЕДЕНИЕ

До недавнего времени наибольшее внимание при проектировании конструкций обращали на вычисление напряжений, мерой прочности которых являлось отношение допущенных напряжений к временному сопротивлению материала. Ряд крупных катастроф показал, что такого расчета для современных инженерных сооружений далеко не достаточно, принятые нормы допускаемых напряжений не всегда обеспечивают надлежащую прочность, необходимы исследования устойчивости как отдельных частей, так и всего проектируемого сооружения.

Таким образом, одним из важнейших направлений развития механики деформированного твердого тела является исследование устойчивости элементов конструкций и деталей машин. Развитие теории устойчивости играет, безусловно, фундаментальную роль в вопросах снижения материалоемкости при оптимальном проектировании, расчетах надежности и долговечности работы конструкций, исследовании их функционирования под воздействием различных комбинаций внешних нагрузок.

В последние десятилетия в инженерной практике все чаще стали использоваться тонкостенные конструкции, в том числе оболочечного типа, которые входят в состав строительных и машиностроительных конструкций, трубопроводов. При проектировании этих конструкций и трубопроводов особое внимание должно уделяться вопросам их устойчивости, исследованию процессов выпучивания и закритического поведения [1–3].

Эффективное использование ресурса материалов заставляет проектировщиков, особенно в конструкциях однократного применения, допускать возникновение пластических деформаций. При этом учет упругопластической стадии деформирования значительно повышает надежность инженерного расчета тонкостенных конструкций, даже при их работе в пределах упругости, за счет более точной оценки предельных нагрузок и коэффициентов запаса устойчивости.

Для конструкций, большинство из которых подвергается воздействию комбинации внешних нагрузок, актуальным является также изучение истории нагружения на процессы выпучивания и устойчивости. Накопление теоретических и экспериментальных данных в этой области имеет большое значение для разработки эффективных методов инженерного расчета [4, 5].

В статье рассматривается задача выпучивания тонкостенной круговой цилиндрической оболочки в виде стержня при комбинированном нагружении осевой сжимающей силой и крутящим моментом как при упругом, так и при упругопластическом деформировании.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим задачу бифуркации тонкостенной круговой цилиндрической оболочки представляемой в виде длинного стержня [1–3, 6].

Длинный стержень, подверженный действию скручивающих пар, может потерять устойчивость, при этом ось стержня образует пространственную кривую. Допустим, что

концы стержня закреплены шарнирно и что пары, моменты которых равны  $M_k$ , приложены по концам стержня, как показано на рис. 1, причем векторы – моменты пар сохраняют свое направление вдоль начальной оси стержня.

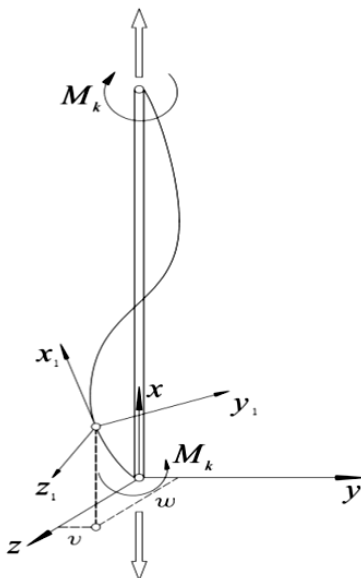


Рис. 1. Выпучивание стержня при кручении

Моменты инерции сечения стержня относительно всех центральных осей пусть будут одинаковы и равны  $I$ .

Рассматриваемая система является неконсервативной, так как в разных вариантах перехода стержня из начального положения в изогнутое, включая поворот торцевых сечений вокруг оси  $x$ , пары могут произвести различную работу. Следовательно, данная задача требует динамического подхода. Однако статический метод приводит здесь к правильным результатам [7–10].

Исходными данными для решения задачи выпучивания стержня являются геометрические параметры, механические характеристики материала и параметры волнообразования.

Задача исследования процесса выпучивания шарнирно подкрепленной круговой цилиндрической оболочки при осевом сжатии решается на основе вариационного метода Ритца. Принимаем выражение для прогибов  $w$  в виде [7, 9]

$$w = f_1 \sin \frac{m\pi x}{L} \sin \frac{ny}{R} + f_2 \sin^2 \frac{m\pi x}{L} + f_0.$$

Первый из этих членов взят исходя из решения задачи об устойчивости; второй отображает несимметричность прогиба относительно срединной поверхности с преимущественным направлением к центру кривизны; третий соответствует радиальным перемещениям точек, принадлежащих торцевым сечениям, при  $x = 0, L$ . Этот член не зависит от  $y$ . Считается, что при выпучивании оболочки торцевые сечения остаются круговыми.

Уравнение для безразмерной нагрузки  $\hat{p}$  для задачи, решаемой в геометрически линейной постановке, представим в виде [7, 9]:

$$p = \frac{\left( -\left( \frac{0,25 \cdot \xi_2}{\eta \cdot \vartheta^2} \right) (\eta + \eta \cdot \vartheta^4) - (0,366 \cdot \eta \cdot \xi_2 \cdot \vartheta^2) (\eta + \eta \cdot \vartheta^4) - \right.}{\left( -\xi_2 \cdot (\eta + \eta \cdot \vartheta^4) - \left( \left( 1 + \frac{8 \cdot \vartheta^4}{S_1^2} \right) - 8 \cdot \vartheta^4 \cdot \eta \cdot \xi_2 \cdot \left( \frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2} \right) \right) \right)},$$

$$\left. -\eta \cdot \vartheta^2 \cdot \xi_2^2 \cdot k \left( \frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2} \right) - \frac{\vartheta^2 \cdot k}{S_1^2 \cdot \eta} - \frac{\eta \cdot S_1^2 \cdot k}{10,92 \vartheta^2} + \frac{\xi_2 k}{4 \vartheta^2} \left( 1 + \frac{8 \vartheta^4}{S_1^2} \right) \right)$$

где

$$k = \left( 1 + \frac{8 \cdot \vartheta^4}{S_1^2} \right) - 8 \cdot \vartheta^4 \cdot \eta \cdot \xi_2 \cdot \left( \frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2} \right);$$

$$s_1 = 1 + \vartheta^2; s_2 = 1 + 9 \vartheta^2; \vartheta = \frac{m \cdot \pi \cdot R}{n \cdot L}; \eta = \frac{n^2 \cdot h}{R};$$

$$\xi_1^2 = \frac{\left( \frac{0,25 \cdot \xi_2}{\eta \cdot \vartheta^2} + 0,366 \cdot \eta \cdot \xi_2 \cdot \vartheta^2 - p \cdot \xi_2 \right)}{\frac{1}{16 \cdot \vartheta^2} \cdot \left( 1 + \frac{8 \cdot \vartheta^4}{S_1^2} \right) - \frac{\eta \cdot \vartheta^2 \cdot \xi_2}{2} \cdot \left( \frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2} \right)};$$

$m$  – число полуволин по образующей;  $n$  – число полных волн вдоль окружности;  $R, L$  – радиус и длина стержня соответственно;  $\eta, \vartheta$  – безразмерные параметры.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуем процесс выпучивания оболочки из стали 45 при осевом сжатии. Выбирая определенные значения  $\vartheta$  и  $\eta$ , строим кривые зависимости  $\hat{p}(\xi_2)$ . Четыре серии таких кривых (для  $\vartheta = 0,3; \vartheta = 0,5; \vartheta = 1,2; \vartheta = 1,8$ ) показаны на рис. 2–5.

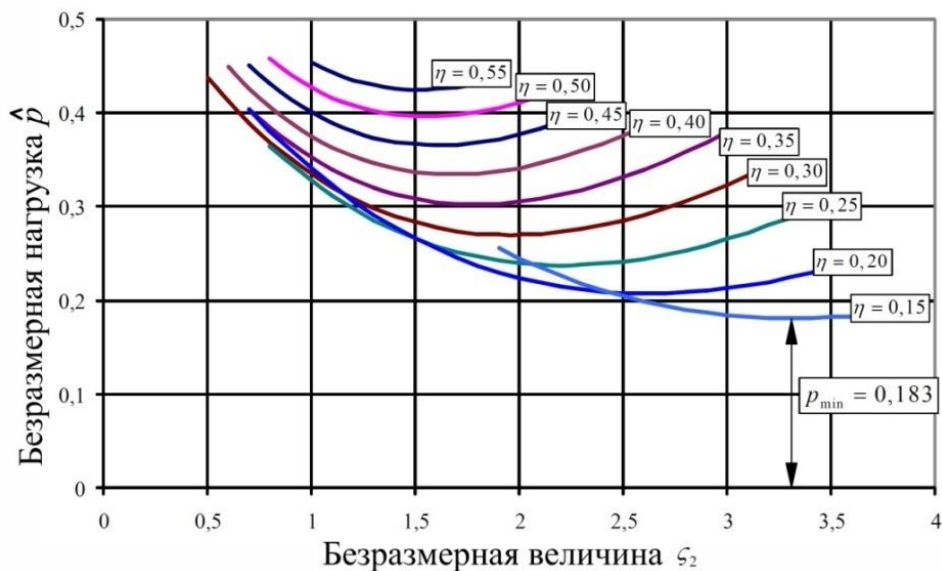


Рис. 2. Равновесные формы оболочки при  $\vartheta = 0,3$

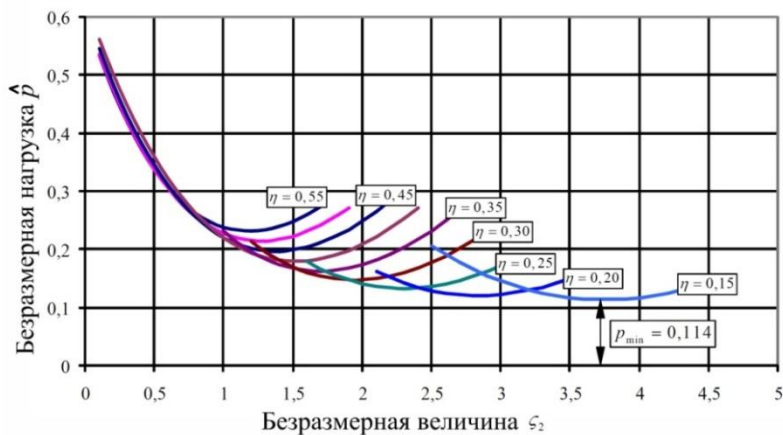


Рис. 3. Равновесные формы оболочки при  $G = 0,5$

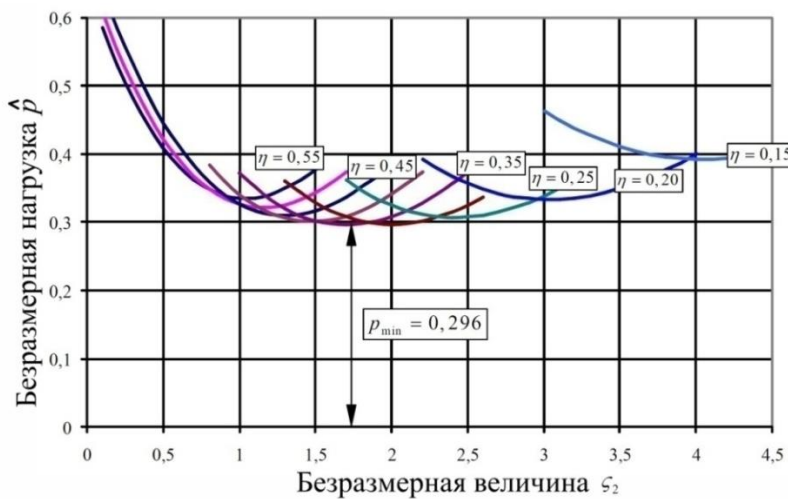


Рис. 4. Равновесные формы оболочки при  $G = 1,2$

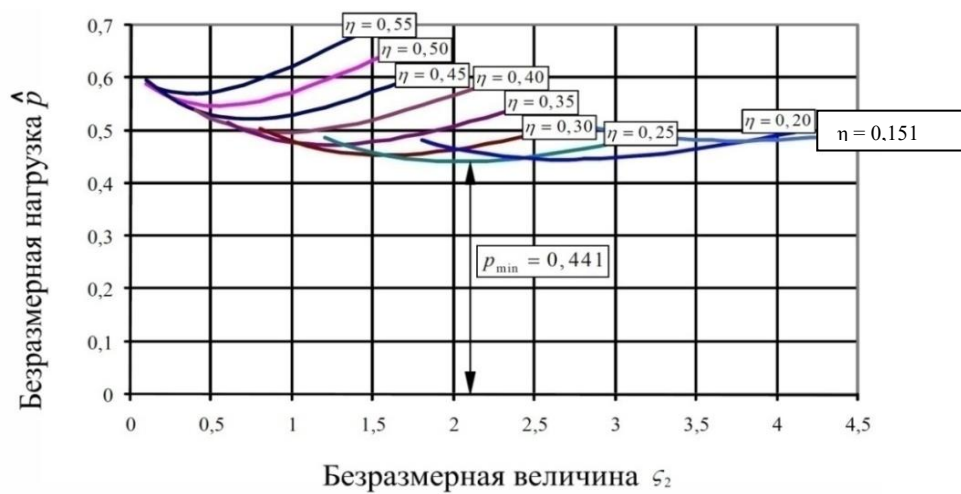


Рис. 5. Равновесные формы оболочки при  $G = 1,8$

Вычисления были также проведены для 12 других значений  $\vartheta$ , лежащих в пределах  $0,3 \leq \vartheta \leq 2,4$ . При сопоставлении всех вариантов оказалось, что наименьшая величина  $p$  – нижнее критическое напряжение, соответствующее параметрам  $\vartheta = 0,5$ ;  $\eta = 0,15$ , равно  $\hat{p}_{\min} = 0,114$ . Таким образом, в первом приближении при подстановке  $\hat{p}_{\min}$  в уравнение

$$p = \frac{p \cdot R}{E \cdot h} \text{ имеем}$$

$$p_n = 0,114 \cdot E \cdot \frac{h}{R}.$$

Из результатов обработки диаграммы деформирования стали 45 принимаем  $E = 2,06 \cdot 10^5$  МПа и строим диаграмму для определения нижнего критического давления.

Характерная кривая выпучивания стержня при некоторых значениях  $R/h$  представлена на рис. 6.

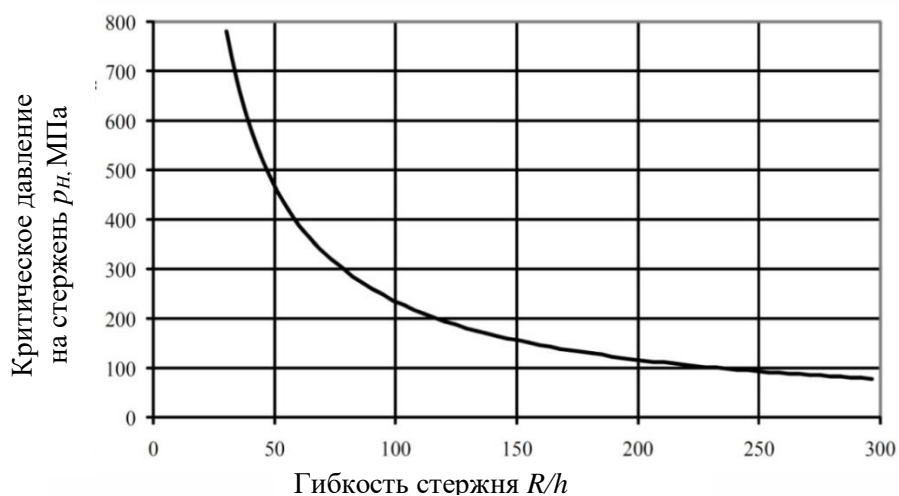


Рис. 6. Расчетные данные для определения нижнего критического давления

Поведение упругопластических образцов за пределом устойчивости при фиксированных  $m$  и  $n$ , в отличие от упругих стержней, характеризуется монотонным падением нагрузки с увеличением прогиба [11–14].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задачи о выпучивании упругопластических оболочек сводится к решению системы двух дифференциальных уравнений, коэффициенты которых сложным образом зависят от искомого решения. Непосредственное интегрирование этих уравнений связано со значительными математическими трудностями. В связи с этим особое значение приобретают численные методы [15, 16].

Эффективными методами приближенного решения краевых задач являются метод конечных элементов и метод конечных разностей, достоинствами которых являются их универсальность при решении как линейных, так и нелинейных задач и слабая зависимость вычислительных схем от краевых условий. Однако зависимость коэффициентов уравнений от искомого решения, наличие разных зон деформирования оболочки (стержня) затрудняют решение вопроса о выборе сетки и размера конечного

элемента при решении рассматриваемой задачи. В связи с этим рациональнее вести исследование процесса выпучивания оболочки в перемещениях на основе вариационного уравнения равновесия [17, 18].

В рассмотренном примере на основе вариационного метода Релея записано уравнение для вычисления критической нагрузки в упругой задаче о выпучивании тонкостенной круговой цилиндрической оболочки при осевом сжатии.

Построены кривые выпучивания при различных значениях параметров волнообразования и огибающая кривая устойчивых состояний оболочки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Охлопков Н.Л., Соколов С.А., Черемных С.В. О границах раздела зон упругой разгрузки и пластической догрузки материала в решении задачи устойчивости круговой цилиндрической оболочки при простых докритических процессах // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2012. № 6-2 (296). С. 8–13.
2. Охлопков Н.Л., Черемных С.В. О предельных поверхностях критических напряжений и деформаций материала в решении задачи устойчивости круговой цилиндрической оболочки при простых процессах // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2012. № 5 (295). С. 30–36.
3. Cheremnykh S., Zubchaninov V., Gulyaev V. Deformation of cylindrical shells of steel 45 under complex loading // *XXII Int. Scientific Conf. «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2019)*. Vol. 97, pp. 1–8. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704025
4. Латифов Ф.С., Юсифов М.З. Выпучивание внецентренно сжатого повреждающегося стержня, контактирующего с агрессивной внешней средой // *Механика машин, механизмов и материалов*. 2014. № 4 (29). С. 60–63.
5. Ильгамов М.А. Выпучивание колеблющегося стержня при продольном ударе // *Известия Уфимского научного центра РАН*. 2015. № 1. С. 27–32.
6. Охлопков Н.Л., Черемных С.В. Устойчивость тонкостенных упругопластических конструкций при реализации процессов сложного комбинированного деформирования // *Известия МГТУ «МАМИ»*. Серия 3. Естественные науки. 2013. Т. 4. № 2 (24). С. 109–114.
7. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Наука, 1967. 984 с.
8. Гудрамович В.С. Устойчивость упругопластических оболочек. Киев: Наукова думка, 1987. 216 с.
9. Зубчанинов В.Г. Устойчивость и пластичность. Т. 1. Устойчивость. М.: Физматлит, 2007. 448 с.
10. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: МГУ, 1990. 310 с.
11. Movchan A.A., Kazarina S.A., Silchenko A.L. Buckling of a rod with a circular cross section induced by a direct thermoelastic martensitic transformation // *Russian metallurgy (Metally)*. 2020. No. 4, pp. 298–304. DOI: 10.1134/S0036029520040199
12. Paimushin V.N. On static and dynamic buckling modes of a rod-strip loaded by follower forces // *Mechanics of Solids*. 2008. Vol. 43. No. 4, pp. 600–609. DOI: 10.3103/S0025654408040080
13. Jiang S., Shi X., Zeng X., Xu B. Deformation behavior and elastic modulus of engineering materials based on compressive rod post-buckling // *Jiangsu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)*. 2014. Vol. 35. No. 1, pp. 107–114. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2014.01.020



14. Tusnin A.R., Tusnina O.A. Numerical analysis of rod systems behavior after buckling // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 153, pp. 791–798. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.244
15. Sharafutdinova G.G. An operator method for studying the euler problem on types of the loss of stability for a pivoted rod under buckling load // *Russian Mathematics*. 2010. Vol. 54. No. 11, pp. 77–82. DOI: 10.3103/S1066369X10110083.
16. Хамитов Т.К., Шигабутдинов Ф.Г. Устойчивость и выпучивание стержня и цилиндрической оболочки при продольном ударе // *Динамические системы в науке и технологиях (DSST-2018)*. Симферополь: Крымский федеральный университет им. Вернадского, 2018. С. 81–82.
17. Ильгамов М.А. Зависимость динамического выпучивания стержня от начальных условий // *Известия Уфимского научного центра РАН*. 2013. № 2. С. 5–10.
18. Устойчивость упругопластических оболочек при сложных процессах комбинированного нагружения: монография / С.В. Черемных [и др.]. Тверь: ТвГТУ, 2021. 160 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

*ЧЕРЕМНЫХ Степан Валерьевич* – старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: [cheremnykh\\_s.v@mail.ru](mailto:cheremnykh_s.v@mail.ru)

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Черемных С.В. Выпучивание стержня из стали 45 под действием осевого сжатия при упругой работе материала // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 3 (11). С. 26–35.

---

## BUCKLING OF THE STEEL ROD 45 UNDER THE ACTION OF AXIAL COMPRESSION DURING THE ELASTIC OPERATION OF THE MATERIAL

*S.V. Cheremnykh*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The problem of loss of stability of an isolated pivotally reinforced rod of a thin-walled circular cross-section under combined loading by an axial compressive force and a torque is investigated. The problem is solved in the bifurcation formulation under the elastic operation of the material. Equations are obtained for calculating the critical stress intensity as a function of the flexibility of a thin-walled rod in the implementation of proportional processes of combined subcritical loading by axial compressive force and torque in the plane of the deviator space of deformations of A.A. Ilyushin. Algorithms and programs for solving the problem of bifurcation of a thin-walled rod of circular cross-section under combined loading by an axial compressive force and a torque are developed for both elastic and elastic-plastic work of the material. An equation is obtained for calculating the critical load in the elastic problem of buckling of a thin-walled circular cylindrical shell under axial compression. In order to verify the obtained equations, a model elastic problem is solved.

**Keywords:** rod, subcritical loading, material deformation, bifurcation, torque, non-conservative system.

#### REFERENCES

1. Ohlopkov N.L., Sokolov S.A., Cheremnykh S.V. On the boundaries between zones of elastic unloading and plastic loading of a material in solving the problem of stability of a circular cylindrical shell in simple subcritical processes. *Fundamentalnie i prikladnie problemi tehniki i tehnologii*. 2012. No. 6-2 (296), pp. 8–13. (In Russian).
2. Ohlopkov N.L., Cheremnykh S.V. On the limiting surfaces of critical stresses and deformations of a material in solving the problem of stability of a circular cylindrical shell in simple processes. *Fundamentalnie i prikladnie problemi tehniki i tehnologii*. 2012. No. 5 (295), pp. 30–36. (In Russian).
3. Cheremnykh S., Zubchaninov V., Gulyaev V. Deformation of cylindrical shells of steel 45 under complex loading. *XXII Int. Scientific Conf. «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2019)*. Vol. 97, pp. 1–8. DOI: 10.1051/e3sconf/20199704025
4. Latifov F.S., Yusifov M.Z. Buckling of a non-centrally compressed, damaged rod in contact with an aggressive external environment. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2014. No. 4 (29), pp. 60–63. (In Russian).
5. Ilgamov M.A. Buckling of the oscillating rod under longitudinal impact. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo centra RAN*. 2015. No. 1, pp. 27–32. (In Russian).
6. Ohlopkov N.L., Cheremnykh S.V. Stability of thin-walled elastic-plastic structures in the implementation of complex combined deformation processes. *Izvestiya MGTU «MAMI». Seriya 3. Estestvennye nauki*. 2013. Vol. 4. No. 2 (24), pp. 109–114. (In Russian).
7. Volmir A.S. Stability of deformable systems. M.: Nauka, 1967. 984 p. (In Russian).
8. Gudramovich V.S. Stability of elastic-plastic shells. Kiev: Naukova dumka, 1987. 216 p. (In Russian).
9. Zubchaninov V.G. Stability and ductility. Vol. 1. Stability. M.: Fizmatlit, 2007. 448 p. (In Russian).
10. Ilyushin A.A. Continuum mechanics. M.: MSU, 1990. 310 p. (In Russian).
11. Movchan A.A., Kazarina S.A., Silchenko A.L. Buckling of a rod with a circular cross section induced by a direct thermoelastic martensitic transformation. *Russian metallurgy (Metally)*. 2020. No. 4, pp. 298–304. DOI: 10.1134/S0036029520040199
12. Paimushin V.N. On static and dynamic buckling modes of a rod-strip loaded by follower forces. *Mechanics of Solids*. 2008. Vol. 43. № 4, pp. 600–609. DOI: 10.3103/S0025654408040080.
13. Jiang S., Shi X., Zeng X., Xu B. Deformation behavior and elastic modulus of engineering materials based on compressive rod post-buckling. *Jiangsu Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)*. 2014. Vol. 35. No. 1, pp. 107–114. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2014.01.020
14. Tusnin A.R., Tusnina O.A. Numerical analysis of rod systems behavior after buckling. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 153, pp. 791–798. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.244
15. Sharafutdinova G.G. An operator method for studying the euler problem on types of the loss of stability for a pivoted rod under buckling load. *Russian Mathematics*. 2010. Vol. 54. No. 11, pp. 77–82. DOI: 10.3103/S1066369X10110083
16. Hamitov T.K., Shigabutdinov F.G. Stability and buckling of the rod and cylindrical shell under longitudinal impact. *Dinamicheskie sistemy v nauke i tekhnologiyah (DSST-2018)*. 2018, pp. 81–82. (In Russian).

17. Igamov M.A. Dependence of the dynamic buckling of the rod on the initial conditions. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo centra RAN*. 2013. No. 2, pp. 5–10. (In Russian).
18. Cheremnykh S V., Sokolov S.A., Gulyaev V.I. Alekseev A.A. *Stability of elastic-plastic shells under complex combined loading processes*. Tver, 2021. 160 p. (In Russian).

#### ABOUT THE AUTHOR

*CHEREMNYKH Stepan Valerievich* – Senior Lecturer of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia.  
E-mail: stepan\_1986@bk.ru

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Cheremnykh S.V. Buckling of the steel rod 45 under the action of axial compression during the elastic operation of the material // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 3(11), pp. 26–35.

УДК 699.844

### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ ВОЗДУШНОГО ШУМА ПЕРЕГОРОДОК ИЗ БЕТОННЫХ БЛОКОВ С НЕИЗВЛЕКАЕМЫМИ ТРУБЧАТЫМИ ПУСТОТООБРАЗОВАТЕЛЯМИ

*В.А. Ясюкович, В.И. Трофимов*

*Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Ясюкович В.А., Трофимов В.И., 2021

**Аннотация.** В эпоху технологического прогресса большое внимание уделяется проблеме шума, длительное воздействие которого оказывает негативное влияние на организм человека. Отмечается, что стены жилых зданий, возводимые из блоков на основе легкого бетона и не только, не всегда отвечают необходимым требованиям по звукоизоляции. Поэтому в данной работе рассматривается эффективность использования бетонных блоков с неизвлекаемыми трубчатыми пустотообразователями в качестве перегородок для шумоизоляции в жилых домах. Произведен расчет с целью определения расчетных значений индекса изоляции воздушного шума для модельных образцов блоков и блоков стандартных размеров. Приводится сравнение с ближайшими аналогами. Представлены основные выводы, сделанные по результатам расчета шумоизоляционных свойств исследуемых блоков, сравнения их с нормативными требованиями и аналогами.

**Ключевые слова:** бетон, пустотность, индекс изоляции, воздушный шум, перегородка из блоков, пустотообразователи, расчет звукоизоляции.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2021-35-44**

#### ВВЕДЕНИЕ

В эпоху технологического прогресса сложно представить общественное или жилое здание без инженерных систем и различного технологического оборудования. Кроме того, в настоящее время для экономии энергоресурсов и создания комфортных условий жизнедеятельности все чаще возводят многоквартирные жилые дома со встроенными

помещениями на первых этажах: магазинами, кафе, офисными помещениями и др. Однако эти помещения являются источником шума, оказывающего негативное воздействие на нервную систему [1]. Если же за стеной проживают беспокойные соседи, то такие условия вряд ли можно назвать комфортными, поскольку на организм постоянно воздействует шум; длительное его воздействие приводит к развитию утомления, нередко переходящего в переутомление, снижению производительности и качества труда [2].

Для обеспечения нормативных уровней звукового давления в изолируемых помещениях ограждающие конструкции (стены и перекрытия) должны обладать необходимой звукоизоляцией. В соответствии со СНиП 23-03-2003 нормируемыми параметрами звукоизоляции являются индексы изоляции воздушного шума ограждающими конструкциями  $R_w$ , дБ [1].

Согласно СП 51.13330.2011, стены и перегородки между квартирами должны иметь индекс изоляции не менее  $R_w = 52$  дБ. Часто эти стены и перегородки выполняются из полнотелых или пустотелых блоков на основе легкого бетона, но стены из таких блоков не всегда отвечают необходимым требованиям по звукоизоляции, что отмечается в работах [3–5]. Бывают также случаи, когда при переселении жильцов в новые дома в первые месяцы эксплуатации выясняется, что условия проживания в них не отвечают требованиям нормального акустического режима отдельных квартир. Например, в работе [6] такая проблема была выявлена в одном из регионов России, где в соответствии с государственной программой переселения из ветхого и аварийного жилья, граждане, проживающие в аварийном помещении, были переселены в сблокированные постройки (с 6–8 квартирами). Перегородки в этих домах представляли собой многослойную конструкцию состоящую из двух типов:

обшивки по деревянному каркасу из двух листов древесно-стружечной плиты толщиной 16 мм каждый с заполнением внутреннего слоя минераловатными плитами толщиной 100 мм;

обшивки из двух листов древесно-стружечной плиты по 16 мм с внутренним слоем из минераловатной плиты толщиной 50 мм и дополнительными слоями из минераловатной плиты 50 мм, воздушного промежутка 37 мм, гипсокартонного листа толщиной 12,5 мм [6].

Шум сегодня – один из наиболее распространенных неблагоприятных физических факторов окружающей среды, приобретающих важное социально-гигиеническое значение, в связи с урбанизацией, а также механизацией и автоматизацией технологических процессов. Поэтому при появлении новой конструкции, например стенового блока, необходимо определить его индекс изоляции воздушного шума – основную характеристику звукоизоляции [2].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Целью данной работы является расчет индекса изоляции воздушного шума для перегородки из стеновых блоков нового конструктивного решения на мелкозернистом бетоне с неизвлекаемыми трубчатыми дискретными пустотообразователями.

Расчет будет производиться для модельных образцов кубов (рис. 1) на мелкозернистом бетоне размером  $100 \times 100 \times 100$  мм с трубчатыми полимерными пустотообразователями диаметром  $d = 20$  мм, толщиной стенки 3,5 мм, содержанием пустотообразователей 40 % от объема изделия, плотностью  $\rho = 1510$  кг/м<sup>3</sup>. Обоснование формы пустотообразователей и способ формирования равномерной пустотной структуры были описаны ранее в работах [7, 8].

Модельные образцы изготавливались из сырьевых материалов: портландцемента ЦЕМ II/A-И 42.5Н производства ООО «Холсим (Рус) СМ»; песка строительного с зернами крупностью не более 2,5 мм, содержанием пылевидных и глинистых частиц 0,9 %, истинной плотностью 2,62 г/см<sup>3</sup>, модулем крупности  $M_k = 2,37$ ; добавки суперпластификатора «Полипласт СП-1».

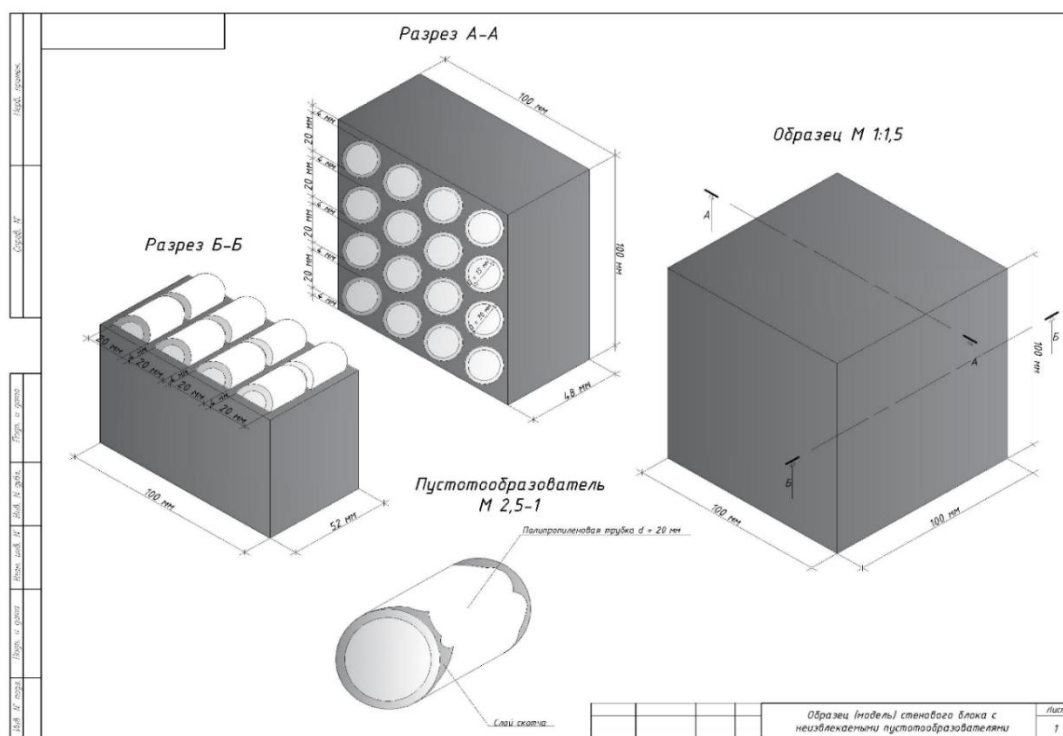


Рис. 1. Модель стенового блока в виде кубического образца с неизвлекаемыми трубчатыми пустотообразователями

Расчет ведем в соответствии с пп. 2.1 и 3.1–3.2 СНиП 23-03-2003. Рассматриваемое ограждение выполняется из мелкозернистых стеновых блоков с неизвлекаемыми пустотообразователями.

Эквивалентную поверхностную плотность  $m_3$  определяем по формуле

$$m_3 = Km,$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий относительное увеличение изгибной жесткости ограждения из бетонов на легких заполнителях, поризованных бетонов и других материалов по отношению к конструкциям из тяжелого бетона с той же поверхностной плотностью;  $m$  – поверхностная плотность, кг/м<sup>2</sup> (для ребристых конструкций принимается без учета ребер).

Для ограждений из бетона плотностью 1 800 кг/м<sup>3</sup> и более с круглыми пустотами коэффициент  $K$  находим по формуле

$$K = 1,5^4 \sqrt{\frac{J}{bh_{пр}^3}}, \quad (1)$$

где  $J$  – момент инерции сечения, м<sup>4</sup>;  $b$  – ширина сечения, м;  $h_{пр}$  – приведенная толщина сечения, м.

Так как плотность бетонной матрицы исследуемых блоков равна  $2\,145\text{ кг/м}^3$ , для расчета  $K$  воспользуемся формулой (1).

Рассматриваемый пустотный блок шириной  $0,1\text{ м}$  и толщиной  $0,1\text{ м}$  имеет 64 вкладыша круглого сечения диаметром  $D = 0,02\text{ м}$  с толщиной стенки  $0,0035\text{ м}$  и длиной  $0,02\text{ м}$ . Вкладыши располагаются в четыре слоя по оси  $x$  (по 16 на каждый слой), расстояние между ними  $0,004\text{ м}$  друг от друга. Момент инерции сечения пустотного блока находим как разность моментов инерции прямоугольного сечения и пустотообразователей.

Момент инерции прямоугольного (квадратного) сечения шириной  $0,1\text{ м}$  и толщиной  $0,1\text{ м}$  относительно центральной оси  $x$  определяем по формуле

$$J_{\text{сеч.у}} = \frac{bh^3}{12}. \quad (2)$$

Необходимо отметить, что образцы состоят из зон (сечений), полностью заполненных бетонной матрицей, и зон, состоящих из вкладышей и бетонной матрицы. Таким образом, момент инерции по формуле (3) следует считать отдельно для разных зон:

для зоны между вкладышами, состоящей из сплошного бетона шириной  $0,08\text{ м}$  и толщиной  $0,02\text{ м}$ ;

зоны, состоящей из бетона и вкладышей шириной  $0,1\text{ м}$  и толщиной  $0,1\text{ м}$ .

Момент инерции трубчатого пустотообразователя, расположенного посередине сечения на оси  $x$ , определяется по формуле

$$J_{\text{отв.х}} = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64},$$

Момент инерции отверстия, сдвинутого относительно центральной оси, находят по формуле

$$J_{\text{отв.вне.х}} = J_{\text{отв.х}} + S_{\text{пуст}} h_2^2,$$

где  $h_2$  – расстояние между осями (центральной и параллельной, проходящей через центр отверстия).

Частотную характеристику изоляции воздушного шума при помощи конструкции ограждения определим графическим способом, изображая ее в виде ломаной линии  $ABCD$  по методике, рассмотренной в СП 23-103-2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий». Начинаем строить линию с построения точки  $B$ .

Абсциссу точки  $B$   $f_B$  определяем по интерполяции по табл. 8 из работы [9] по плотности материала конструкции  $1\,510\text{ кг/м}^3$  и толщине  $0,1\text{ м}$ :

$$f_B = \frac{31\,900}{h}.$$

Значение  $f_B$  следует округлять до среднегеометрической частоты, в пределах которой находится  $f_B$  по табл. 9 [7].

Ординату точки  $B$   $R_B$  находим в зависимости от эквивалентной поверхностной плотности  $m_3$  по формуле

$$R_B = 20 \lg m_3 - 12.$$

Значение  $R_B$  следует округлять до  $0,5\text{ дБ}$  [9]. Таким образом, получаем координаты точки  $B$ . Далее из точки  $B$  влево до  $100\text{ Гц}$  проводим горизонтальный участок  $BA$ , а вправо от точки  $B$  – отрезок  $BC$  с подъемом  $6\text{ дБ}$  на октаву до точки  $C$  с ординатой  $R_C = 65\text{ дБ}$ .

Из точки  $C$  вправо проводится горизонтальный отрезок  $CD$ . Если точка  $C$  лежит за пределами нормируемого диапазона частот ( $f_C > 3\,150\text{ Гц}$ ), отрезок  $CD$  отсутствует [9].

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Результаты расчетов:

$$j_{\text{сеч.}x1} = \frac{0,08 \cdot 0,02^3}{12} = 5,33 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4; j_{\text{сеч.}x2} = \frac{0,1 \cdot 0,1^3}{12} = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4;$$

$$j_{\text{отв.}x} = \frac{3,14 \cdot (0,02^4 - 0,013^4)}{64} = 6,44 \cdot 10^{-9} \text{ м}^4;$$

$$j_{\text{отв.вне.}x1} = 6,44 \cdot 10^{-9} + 3,14 \cdot 0,0065^2 \cdot 0,012^2 = 2,55 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4;$$

$$j_{\text{отв.вне.}x2} = 6,44 \cdot 10^{-9} + 3,14 \cdot 0,0065^2 \cdot 0,036^2 = 1,78 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4.$$

Суммарный момент инерции пустотообразователей для 1

$$j_{\text{отв.вне.}x1} = 8 \cdot 2,55 \cdot 10^{-8} = 2,04 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4.$$

Суммарный момент инерции пустотообразователей для 2

$$j_{\text{отв.вне.}x2} = 8 \cdot 1,78 \cdot 10^{-7} = 1,42 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4.$$

Суммарный момент инерции пустотообразователей 1 и 2

$$j_{\Sigma \text{всех отв.}} = 2,04 \cdot 10^{-7} + 1,42 \cdot 10^{-6} = 1,63 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4.$$

Момент инерции сечения с учетом отверстий:

$$j_{\text{сеч.с.отв}} = j_{\text{сеч.}x1} + j_{\text{сеч.}x2} - j_{\Sigma \text{всех отв.}}$$

$$j_{\text{сеч.с.отв}} = 5,33 \cdot 10^{-8} + 8,33 \cdot 10^{-6} - 1,63 \cdot 10^{-6} = 6,75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4.$$

Площадь сечения блока

$$S_{\text{сеч}} = 0,1 \cdot 0,1 = 0,01 \text{ м}^2.$$

Площадь сечения одного отверстия диаметром 0,013 м

$$S_{\text{отв}} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,013^2}{4} = 1,32 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Для 16 отверстий

$$S_{\Sigma \text{отв}} = 16 \cdot 1,32 \cdot 10^{-4} = 0,002 \text{ м}^2.$$

Площадь сечения без отверстий (приведенная):

$$S_{\text{пр}} = 0,01 - 0,002 = 0,008 \text{ м}^2.$$

Приведенная толщина сечения

$$h_{\text{пр}} = \frac{S_{\text{пр}}}{b} = \frac{0,008}{0,1} = 0,08 \text{ м}.$$

Тогда по формуле (2)

$$K = 1,5 \sqrt[4]{\frac{6,75 \cdot 10^{-6}}{0,1 \cdot 0,08^3}} = 1,5 \sqrt[4]{0,1381} = 1,5 \cdot 0,61 = 0,915;$$

$$m_3 = Kt = K\rho\delta = 0,915 \cdot 1510 \cdot 0,1 = 138,165 \text{ кг/м}^2; f_B = \frac{31900}{h} = \frac{31900}{100} = 319 \text{ Гц}.$$

Значение  $f_B$  следует округлять до среднегеометрической частоты, в пределах которой находится  $f_B$  по табл. 9 [7]. Получаем  $f_B = 315 \text{ Гц}$ .

Ординату точки  $B$   $R_B$  определяем в зависимости от эквивалентной поверхностной плотности  $m_3$  по формуле (6):

$$R_B = 20 \lg m_3 - 12 = 20 \lg \cdot 138,17 - 12 = 20 \cdot 2,14 - 12 = 30,8 \approx 31 \text{ дБ}.$$

Значение  $R_B$  следует округлять до 0,5 дБ [9]. Таким образом, получаем координаты точки  $B$  (319 Гц, 31 дБ). Построение частотной характеристики показано на графике (рис. 2).

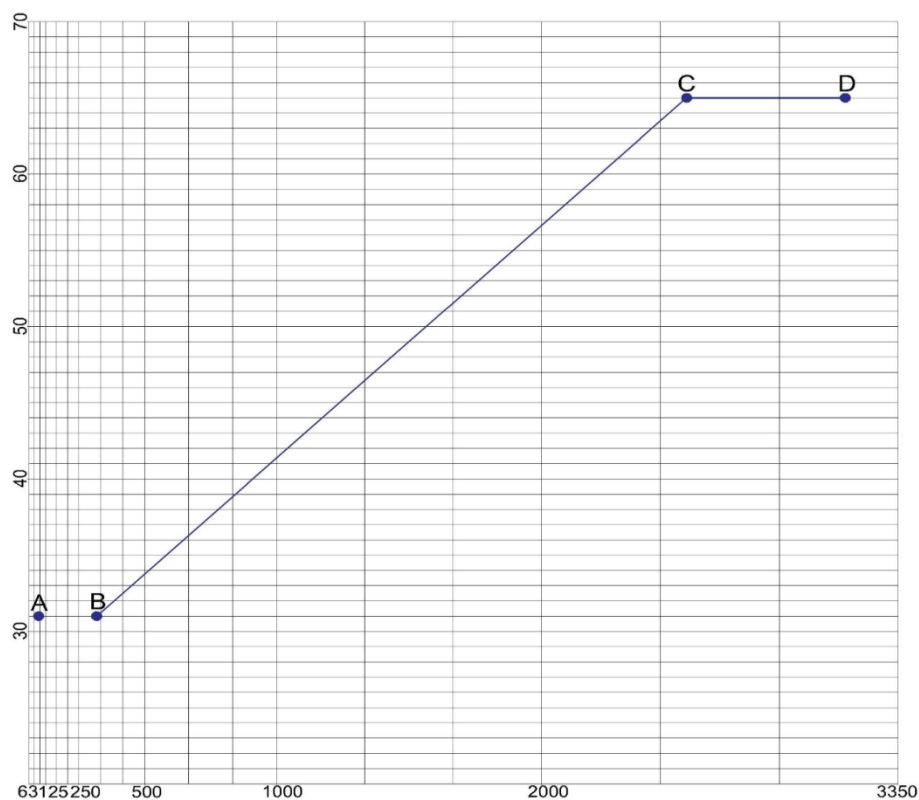


Рис. 2. Частотная характеристика воздушного шума исследуемого блока

Индекс изоляции воздушного шума  $R_w$ , дБ, ограждающей конструкцией с известной (рассчитанной или измеренной) частотной характеристикой изоляции воздушного шума находим через сопоставление этой частотной характеристики с оценочной кривой, приведенной в табл. 4, п. 1 [9]. Полученные величины изоляции воздушного шума приведены в табл. 1.

Расчетный индекс изоляции воздушного шума для модельных образцов размером  $100 \times 100 \times 100$  мм с цилиндрическими пустотообразователями  $d = 20$  мм (содержание пустотообразователей 40 % от объема изделия),  $p = 1510$  кг/м<sup>3</sup> равен  $R_w = 40$  дБ.

После того как расчетным путем был определен индекс изоляции воздушного шума для модельных образцов, полученных в лаборатории, проведем оценочный расчет для стенового блока на мелкозернистом бетоне стандартных размеров в соответствии с ГОСТ 6133-2019 длиной 390 мм, шириной 190 мм и высотой 188 мм. Объем пустот такой же, как и для модельного образца, а следовательно, и плотность предположительно та же:  $p = 1510$  кг/м<sup>3</sup>. Для этого блока используем трубчатые пустотообразователи  $d = 40$  мм с толщиной стенки 3,7 мм. Располагаются они в три слоя по оси  $y$  (по 24 на каждый слой). Расстояние между ними 0,0175 м по оси  $y$  и 0,0077 м по оси  $x$  друг от друга. Расчет проведем по тем же формулам что и для модельных образцов.



Таблица 1

Параметр	Среднегеометрические частоты третьоктавных полос, Гц															
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150
Изоляция воздушного шума $R_i$ , дБ	33	36	39	42	45	48	51	52	53	54	55	56	56	56	56	56
Расчетная частотная характеристика $R$ , дБ	31	31	31	31	31	31	32	34	36	38	41	45	51	58	–	–
Неблагоприятные отклонения, дБ	2	5	8	11	14	17	19	18	17	16	14	11	5	–	–	–
Σ неблагоприятных отклонений, дБ														157		
Оценочная кривая, смещенная вниз на 12 дБ	21	24	27	30	33	36	39	40	41	42	43	44	44	44	44	44
Неблагоприятные отклонения от смещенной оценочной кривой, дБ	–	–	–	–	2	5	7	6	5	4	2	–	–	–	–	–
Σ неблагоприятных отклонений, дБ														31		
Индекс изоляции $R_w$ , дБ									40							

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был рассчитан индекс изоляции воздушного шума  $R_w = 40$  дБ для модельных образцов кубов (см. рис. 1) на мелкозернистом бетоне размером  $100 \times 100 \times 100$  мм с трубчатыми полимерными пустотообразователями, после чего проведен оценочный расчет для стенового блока на мелкозернистом бетоне стандартных размеров в соответствии с ГОСТ 6133-2019 длиной 390 мм, шириной 190 мм и высотой 188 мм, с тем же объемом пустот и плотностью, как и для модельного образца, но с трубчатыми пустотообразователями других размеров  $d = 40$  мм с толщиной стенки 3,7 мм. Индекс изоляции воздушного шума рассматриваемой конструкцией ограждения составляет  $R_w = 49$  дБ, что ниже нормируемых значений для стен и перегородок между квартирами в соответствии с СП 51.13330.2011. Однако  $R_w$  рассматриваемых блоков выше по сравнению с такими же из пено-, газо- или керамзитобетона и некоторыми другими блоками, представленными в работах [1–5, 10]. Для сравнения индексы изоляции воздушного шума некоторых ограждений из данных работ приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Индексы изоляции различных однослойных ограждений

Вид перегородки, блока	Толщина блока, мм	Индекс изоляции воздушного шума $R_w$ , дБ
Блоки на мелкозернистом бетоне с трубчатыми пустотообразователями, $\rho = 1\,510 \text{ кг/м}^3$	190	49
Блоки газобетонные, $\rho = 562,7 \text{ кг/м}^3$	200	43
Блоки газобетонные, $\rho = 600 \text{ кг/м}^3$	200	45
Блоки пенобетонные D500	200	44
Блоки пенобетонные D600	200	47
Керамзитобетонные блоки, зашпаклеванные с двух сторон, $\rho = 1\,200 \text{ кг/м}^3$	90	35
Пазогребневая плита пустотелая, $\rho = 1\,350 \text{ кг/м}^3$	80	35
Силикатный стеновой пустотелый блок, $\rho = 1\,700 \text{ кг/м}^3$	130	45

**ВЫВОДЫ**

1. В работе был рассчитан индекс изоляции воздушного шума  $R_w = 40$  дБ для модельных образцов размером  $100 \times 100 \times 100$  мм с цилиндрическими пустотообразователями ( $d = 20$  мм,  $\rho = 1\,510 \text{ кг/м}^3$ ).

2. Был произведен оценочный расчет индекса изоляции воздушного шума для стенового блока на мелкозернистом бетоне стандартных размеров в соответствии с ГОСТ 6133-2019 длиной 390 мм, шириной 190 мм и высотой 188 мм, с объемом пустот таким же, как и для модельного образца, плотностью  $\rho = 1\,510 \text{ кг/м}^3$ , используя трубчатые пустотообразователи  $d = 40$  мм.

3. Определенный индекс изоляции воздушного шума для стенового блока на мелкозернистом бетоне стандартных размеров  $R_w = 49$  дБ ниже нормируемых значений для стен и перегородок между квартирами в соответствии с СП 51.13330.2011. Однако  $R_w$  рассматриваемых блоков выше значений некоторых из аналогов.

4. Определение звукоизоляции расчетом методом ожидаемой шумности или методом нормируемых параметров проводится для сравнительных оценок. Абсолютные оценки остаются исключительно за измерениями.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гречишкин А.В., Литвинова М.А., Праслов М.А. Методы снижения шума в помещениях, смежных с инженерным и технологическим оборудованием // *Образование и наука в современном мире. Инновации*. 2018. № 4 (17). С. 198–203.
2. Головкова Н.В. Расчет индекса изоляции воздушного шума перегородками из блоков // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2012. № 4 (4). С. 41–49.
3. Редько Ю.Б. Определение звукоизоляции ограждающей конструкции из керамзито-бетона в лабораторных условиях // *Кровельные и изоляционные материалы*. 2013. № 6. С. 14–15.
4. Шевцова М.А., Чернеев А.М., Склифос В.О. Оценка звукоизоляционной способности внутренних стен из блоков бетона D600 и D500 // *Перспективы науки*. 2019. № 11 (122). С. 55–57.
5. Пименов И.К., Дементьев Н.А., Кузнецова А.Д. Анализ звукоизолирующих характеристик однопустотных перегородочных камней // *Защита от повышенного шума и вибрации: Сборник докладов VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. СПб.: Институт акустических конструкций, 2019. С. 800–807.

6. Гречишкин А.В., Гречишкина В.А. Повышение звукоизоляции межквартирных перегородок заблокированных многоквартирных жилых домов // *Образование и наука в современном мире. Инновации*. 2019. № 4 (23). С. 168–172.
7. Трофимов В.И., Ясюкович В.А. Учет физического состояния дисперсной системы при формировании многопустотной структуры бетона // *Сборник научных трудов по материалам национальной научно-технической конференции с международным участием*. Новосибирск, 2021. С. 210–214.
8. Патент РФ 2751529. *Строительная панель пустотного настила* / Трофимов В.И.; Заявл. 19.11.2020. Опубл. 14.07.2021. Бюл. № 20.
9. СП 23-103-2003. Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий. М.: Госстрой России, 2003. 57 с.
10. Фомина Е.В., Лесовик В.С., Лашина И.В. Газобетон для строительных объектов транспортной инфраструктуры // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2018. № 5 (63). С. 774–786.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*ЯСЮКОВИЧ Владислав Александрович* – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vlad.jasjukovich212@gmail.com  
*ТРОФИМОВ Валерий Иванович* – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vitrofa@mail.ru

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Ясюкович В.А., Трофимов В.И. Оценка эффективности изоляции воздушного шума перегородок из бетонных блоков с неизвлекаемыми трубчатыми пустотообразователями // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 3 (11). С. 35–44.

---

## ASSESSMENT OF AIR NOISE ISOLATION OF PARTITIONS MADE OF BLOCKS WITH NON-REMOVABLE VOID GENERATORS

*V.A. Yasyukovich, V.I. Trofimov*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** In the era of technological progress, much attention is paid to such a problem as noise, the long-term impact of which has a negative impact on the human body. It is noted that the walls of residential buildings erected from blocks based on light concrete and not only do not always meet the necessary requirements for sound insulation. Therefore, this paper considers the effectiveness of using concrete blocks with non-removable tubular voids, as partitions, for noise insulation in residential buildings. The calculation was made to determine the calculated values of the air noise insulation index for model samples of blocks and blocks of standard sizes. A comparison with the nearest analogues is given. At the end, the main conclusions are presented, based on the results of calculating the noise insulation properties of the studied blocks, comparing them with regulatory requirements and analogues.

**Keywords:** beton, voidness, insulation index, air noise, partition made of blocks, void formers, calculation of sound insulation.

#### REFERENCES

1. Grechishkin A.V., Litvinova M.A., Praslov M.A. Methods of noise reduction in rooms adjacent to engineering and technological equipment. *Obrazovanie i nauka v sovremennom mire. Inovazii*. 2018. No. 4 (17), pp. 198–203. (In Russian).
2. Golovkova N.V. Calculation of the air noise isolation index by partitions from blocks. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij*. 2012. No. 4 (4), pp. 41–49. (In Russian).
3. Redko Y.B. Determination of sound insulation of the enclosing structure made of expanded clay concrete in laboratory conditions. *Krovel'nye i izolyacionnye materialy*. 2013. No. 6, pp. 14–15. (In Russian).
4. Shevtsova M.A., Cherneyev A.M., Sklifos V.O. Assessment of the sound insulation capacity of internal walls made of D600 and D500 concrete blocks. *Perspektivy nauki*. 2019. No. 11 (122), pp. 55–57. (In Russian).
5. Pimenov I.K., Dementiev N.A., Kuznetsova A.D. Analysis of sound-insulating properties of single-cavity partition stones. *Protection against increased noise and vibration: Collection of Reports of the VII All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*. SPb., 2019, pp. 800–807. (In Russian).
6. Grechishkin A.V., Grechishkina V.A. Improving the sound insulation of inter-apartment partitions of interlocked apartment buildings. *Obrazovanie i nauka v sovremennom mire. Innovacii*. 2019. No. 4 (23), pp. 168–172. (In Russian).
7. Trofimov V.I., Yasyukovich V.A. Taking into account the physical state of the dispersed system during the formation of the hollow-core structure of concrete. *Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the National Scientific and Technical Conference with International Participation*. Novosibirsk, 2021, pp. 210–214.
8. Patent RF 2020138061. *Hollow core construction panel*. Trofimov V.I. Declared 11.19.2020. Published 07.14.2021. Bulletin No. 20. (In Russian).
9. SP 23-103-2003. Design of soundproofing of enclosing structures of residential and public buildings. Moscow: Gosstroy of Russia, 2003. 57 p.
10. Fomina E.V., Lesovik V.S., Lashina I.V. Aerated concrete for construction objects of transport infrastructure. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta*. 2018. No. 5 (63), pp. 774–786. (In Russian).

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*YASYUKOVICH Vladislav Aleksandrovich* – Graduate Student of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vlad.jasjukovich212@gmail.com

*TROFIMOV Valerij Ivanovich* – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of the Department Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vitrofa@mail.ru

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Yasyukovich V.A., Trofimov V.I. Assessment of air noise isolation of partitions made of blocks with non-removable void generators // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 3 (11), pp. 35–44.

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

УДК 621.3.019:622:519.2

**ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ  
РЕМОНТНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ  
КОММУТАЦИОННО-ПУСКОВОЙ АППАРАТУРЫ  
С ДИАГНОСТИКОЙ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ***Г.С. Кузьмин**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Кузьмин Г.С., 2021

**Аннотация.** В статье приведена целевая функция, представляющая вероятностную экономико-математическую модель оптимизации периодичностей технического обслуживания коммутационно-пусковых аппаратов. Модель разработана для стратегии обслуживания, при которой решение о ремонте или замене аппарата принимается по результатам периодически проводимого контроля сопротивления изоляции, совмещенного с ремонтным осмотром и проверкой исправности механических частей. В качестве целевой функции взяты удельные ремонтно-профилактические затраты.

**Ключевые слова:** электрические коммутационно-пусковые аппараты, ремонт, профилактика, обслуживание, модель оптимизации, целевая функция, надежность, наработка на отказ, электрическая изоляция.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2021-45-49****ВВЕДЕНИЕ**

Оптимизация мероприятий по техническому обслуживанию (ТО) производится на основе математических моделей [1], адекватно отражающих основные стратегии обслуживания разных типов электрооборудования (ЭО).

Под стратегией обслуживания понимается определенный порядок выполнения мероприятий по ТО, зависящий от некоторого набора возможных действий как послеаварийного, так и предупредительного характера, которым располагает персонал. Типы стратегий обслуживания обусловлены правилами технической эксплуатации [2], а также разнообразием и различием факторов и особенностей проведения ТО для разных типовых групп ЭО.

Классификация мероприятий ТО и основных стратегий обслуживания, характерных для низковольтного взрывобезопасного ЭО, а именно электродвигателей и коммутационно-пусковых аппаратов (КПА) (магнитных пускателей и автоматических фидерных выключателей), эксплуатируемых на предприятиях угольной промышленности, приводится в работе [3]. Там же показано, что в отличие от двигателей для КПА целесообразна плановая стратегия группового ТО с диагностикой состояния и минимальным аварийным ремонтом (АРМ) при отказе (стратегия ТО с АРМ). Обслуживание производится циклически по истечении определенного календарного времени  $T_{п}$ . Основным контролируемым параметром является омическое сопротивление изоляции [4].

Если отказы электродвигателей определяются в основном отказами изоляции и при обсуждении периодичности ТО можно пренебречь отказами механических элементов, то для КПА подобное решение может привести к серьезным ошибкам, поскольку значительная часть отказов пускателей и автоматических выключателей вызвана неисправностями механических элементов [3].

Отказы КПА, возникающие в межпрофилактический период, устраняются в основном минимальным ремонтом. При этом уровень сопротивления изоляции КПА при проведении такого ремонта остается неизменным и при дальнейшей эксплуатации продолжает снижаться до критического состояния [5], что может привести к отказу, если не осуществить своевременную диагностику.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ИСХОДА ДИАГНОСТИКИ

Состояние КПА после проведения диагностики опишем функцией  $Z = (0 \vee 1)$ , которая принимает значение 0, если КПА выдержал диагностическую проверку (если сопротивление изоляции выше критического и отсутствуют неисправности механических элементов), в противном случае оно равно 1. Тогда  $P\{Z = 0\}$  – вероятность того, что КПА выдержит диагностическую проверку и останется функционировать на следующий межпрофилактический период, а  $P\{Z = 1\}$  – вероятность того, что КПА окажется дефективным. Поскольку события  $\{Z = 0\}$  и  $\{Z = 1\}$  несовместимы и противоположны, то  $P\{Z = 1\} = 1 - P\{Z = 0\}$ .

С учетом вышеизложенного вероятность  $P\{Z = 1\}$  отрицательного исхода после проведения диагностики определится как вероятность события, состоящего в том, что изоляция КПА откажет на интервале  $(T_{\Pi}, 2T_{\Pi})$  (т. е. сопротивление изоляции опустится ниже критического уровня в предстоящий межпрофилактический период) при условии отсутствия полных восстановлений ее в течение времени  $t = T_{\Pi}$  (отработанного межпрофилактического периода). Тогда

$$P\{Z = 1\} = P\{T_{\Pi} < t \leq 2T_{\Pi} | T_{\Pi} < t\}.$$

Для любых двух событий А и В

$$P\{A|B\} = P\{A \cap B\} / P\{B\}.$$

Однако событие  $\{T_{\Pi} < t \leq 2T_{\Pi}\} \cap \{T_{\Pi} < t\}$  совпадает с событием  $\{T_{\Pi} < t \leq 2T_{\Pi}\}$ .

Тогда

$$P\{Z = 1\} = \frac{P\{T_{\Pi} < t \leq 2T_{\Pi}\}}{P\{T_{\Pi} < t\}} = \frac{F(2T_{\Pi}) - F(T_{\Pi})}{\Psi(T_{\Pi})}, \quad (1)$$

где  $F(T_{\Pi})$  и  $F(2T_{\Pi})$  – функции распределения наработок на отказ изоляции КПА соответственно в моменты времени  $t = T_{\Pi}$  и  $t = 2T_{\Pi}$ ;  $\Psi(T_{\Pi}) = 1 - F(T_{\Pi})$  – функция распределения уровней надежности (безотказной работы) КПА при  $t = T_{\Pi}$ .

Вероятность положительного исхода диагностики определится как вероятность противоположного события:

$$P\{Z = 0\} = 1 - P\{Z = 1\} = \frac{\Psi(2T_{\Pi})}{\Psi(T_{\Pi})}. \quad (2)$$

Процесс технического обслуживания КПА можно описать случайным процессом  $x(t)$ , характеризующим в общем случае состояние электроаппаратуры в произвольный момент времени  $t$ :

$$x(t) = \begin{cases} E_0, & \text{если в момент } t \text{ электроаппаратура работает;} \\ E_1, & \text{если в момент } t \text{ производится АРМ;} \\ E_2, & \text{если в момент } t \text{ произведена диагностика и } Z = 0; \\ E_3, & \text{если в момент } t \text{ произведена диагностика и } Z = 1. \end{cases}$$

### ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

При организации ТО все издержки как от аварийных ремонтов, так и от профилактических осмотров входят в себестоимость продукции и оказывают существенное влияние на общие показатели работы. Поэтому при определении  $T_{\Pi}$  в качестве целевой функции оптимизации необходимо использовать удельные стоимостные затраты в единицу времени работы оборудования, руб./ч, которые в общем виде при плановом режиме обслуживания, как показано в [1], находят из выражения

$$C = \sum_{i=1}^3 MG^{(i)} / T_{\Pi}, \quad (3)$$

где  $T_{\Pi}$  – периодичность ТО, ч;  $i$  – номер восстановительной работы ( $i = 1, 2, 3$ ), соответствующей состоянию  $E_i$ ;  $MG^{(i)}$  – средние суммарные стоимостные затраты (математическое ожидание) при нахождении электрооборудования в  $i$ -м восстановительном состоянии  $E_i$  за межпрофилактический период  $T_{\Pi}$ , руб.;  $G^{(i)}$  – средняя стоимость  $i$ -й восстановительной работы, руб.

Обозначим

$$G^{(i)} = \begin{cases} G_M, & i = 1, x(t) \in E_1; \\ G_n^0, & i = 2, x(t) \in E_2; \\ G_n^1, & i = 3, x(t) \in E_3. \end{cases}$$

При этом  $G_n^1 = G_n^0 + G_3$ , где  $G_3$  – дополнительные стоимостные затраты на ремонт электроаппарата, не выдержавшего диагностики, руб.

Тогда

$$MG^{(2)} = G_n^0 \cdot P\{Z = 0\}; \quad MG^{(3)} = G_n^1 \cdot P\{Z = 1\}. \quad (4)$$

Как показано в [3], минимальные аварийные ремонты, производимые при отказах механических элементов КПА, не оказывают влияния на состояние контролируемого параметра (сопротивления изоляции). Для подобных случаев [1] математическое ожидание количества отказов на интервале  $(0, T_{\Pi})$  определяется выражением  $\int_0^{T_{\Pi}} \lambda(t) dt$ , где  $\lambda(t)$  – интенсивность отказов КПА. Тогда

$$MG^{(1)} = G_M \cdot \int_0^{T_{\Pi}} \lambda(t) dt, \quad (5)$$

Подставив равенства (4) и (5) в формулу (3) с учетом выражений (1) и (2), получим формулу для удельных стоимостных затрат при стратегии ТО КПА с АРМ при отказе:

$$C = \frac{1}{T_n} \left\{ G_M \cdot \int_0^{T_n} \lambda(t) dt + G_n^0 + G_3 \left[ 1 - \frac{\Psi(2T_n)}{\Psi(T_n)} \right] \right\}. \quad (6)$$

Оптимальная периодичность ТО  $T_n^*$  определяется как аргумент, соответствующий минимуму функции (6).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования получена математическая модель, описывающая отрицательный и положительный исход диагностирования КПА, и выведена целевая функция оптимизации ТО КПА с диагностикой состояния и минимальным аварийным ремонтом, позволяющая определить оптимальную периодичность обслуживания. Полученная модель позволит эффективно управлять удельными ремонтно-профилактическими затратами.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барзилович Е.Ю., Каштанов В.А. Некоторые математические вопросы теории обслуживания сложных систем. М.: Советское радио, 1971. 272 с.
2. Орлова Т.М. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. М.: КноРус, 2013. 280 с.
3. Кузьмин Г.С. Выбор стратегий технического обслуживания электрооборудования для построения моделей оптимизации // *Энергоресурсосбережение в промышленности: сборник научно-практических трудов* / под ред. А.Н. Макарова. Вып. 8. Тверь: ТвГТУ, 2020. С. 192–197.
4. Кузьмин Г.С. Характер отказов взрывозащищенного электрооборудования и выбор параметров неразрушающего контроля его надежности в процессе эксплуатации // *Энергоресурсосбережение в промышленности: сборник научно-практических трудов* / под ред. А.Н. Макарова. Вып. 8. Тверь: ТвГТУ, 2020. С. 188–192.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

*КУЗЬМИН Геннадий Серафимович* – канд. техн. наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: rucndthm@yandex.ru

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Кузьмин Г.С. Экономико-математическая модель оптимизации ремонтно-профилактического обслуживания коммутационно-пусковой аппаратуры с диагностикой состояния изоляции // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 3 (11). С. 45–49.



**ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMIZATION  
OF REPAIR AND PREVENTIVE MAINTENANCE OF SWITCHING  
AND STARTING EQUIPMENT WITH DIAGNOSTICS  
OF THE INSULATION CONDITION****G.S. Kuzmin***Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article presents the conclusion of the objective function, which is a probabilistic economic and mathematical model for optimizing the frequency of maintenance of switching and starting devices. The model is designed for a maintenance strategy, in which the decision to repair or replace the device is made based on the results of periodic monitoring of the insulation resistance, combined with a repair inspection and checking the serviceability of mechanical parts. The specific repair and maintenance costs are taken as the target function.

**Keywords:** electrical switching and starting devices, repair, prevention, maintenance, optimization model, target function, reliability, time to failure, electrical insulation.

**REFERENCES**

1. Barzilovich E.Yu., Kashtanov V.A. Some mathematical questions of the theory of complex systems maintenance. M.: Sovetskoe radio, 1971. 272 p. (In Russian).
2. Orlova T.M. Rules of technical operation of electrical installations of consumers. M.: KnoRus, 2013. 280 p. (In Russian).
3. Kuzmin G.S. The choice of strategies for maintenance of electrical equipment for building optimization models. *Energy Resource Saving in Industry: Collection of Scientific and Practical Works* / ed. by A.N. Makarov. Is. 8. Tver: TvSTU, 2020, pp. 192–197. (In Russian).
4. Kuzmin G.S. The nature of failures of explosion-proof electrical equipment and the choice of parameters of non-destructive testing of its reliability during operation. *Energy Resource Saving in Industry: Collection of Scientific and Practical Works* / ed. by A.N. Makarov. Is. 8. Tver: TvSTU, 2020, pp. 188–192. (In Russian).

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

*KUZMIN Gennadiy Serafimovich* – Candidate of Technical Sciences, Associated Professor of Department of Power Supply and Electrical Equipment, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: rucndthm@yandex.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Kuzmin G.S. Economic and mathematical model of optimization of repair and preventive maintenance of switching and starting equipment with diagnostics of the insulation condition // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 3 (11), pp. 45–49.

УДК 621.3.08.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ КАК СФЕРА СИСТЕМНОГО ПОДХОДА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ НА БАЗЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ

*С.В. Маринова*

*Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Маринова С.В., 2021

**Аннотация.** В статье рассмотрены виды и методы прогноза электрической нагрузки, описаны модели отечественных и зарубежных разработок.

**Ключевые слова:** прогнозирование электроэнергии, методы прогноза, электрическая нагрузка.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2021-50-65**

Существующий сегодня в России оптовый рынок электроэнергии и мощности (ОРЭМ) представляет собой отлаженную структуру крупных производителей, потребителей, связанных между собой единством технологического процесса производства, передачи и потребления энергоресурса.

В сферу обращения электроэнергии (мощности) входят:

поставщики электроэнергии (гидро-, атомные электростанции, генерирующие, территориальные компании);

сетевые организации и системный оператор (транспорт электроэнергии с учетом сальдо-перетоков);

сбытовые компании и крупные потребители.

Сложившийся таким образом подход к электротехнической системе использует рыночные механизмы для формирования тарифов по факту загрузки мощностей поставщиков и использованных ресурсов на выработку электроэнергии. Торговля отклонениями от плановых заявок осуществляется в режиме реального времени на балансирующем рынке. Стимулирование участников ОРЭМ к более точному исполнению своих плановых графиков потребления (выработки) электроэнергии формируется стоимостью отклонений, при которых штрафуются участники, допустившие наибольшие отклонения от плана, и поощряются (премируются) участники, максимально точно придерживающиеся своих поданных заявок. Как видно, такая система оснащена дополнительными стимулирующими финансовыми факторами, обеспечивающими прозрачность ценообразования, отражающего баланс спроса и предложения. Целью выхода потребителя на ОРЭМ является покупка электроэнергии (мощности) на оптимально низкой стоимости, что в условиях рыночной экономики уменьшит себестоимость продукции и повысит конкурентоспособность предприятия. В свою очередь, регламент рынка предусматривает требования к подаче заявок на покупку электроэнергии «рынка на сутки вперед». Некачественная заявка с плановыми расходами может свести к минимуму все ожидаемые выгоды, поскольку существенные отклонения фактических расходов от плановых заявок приведет к дополнительным затратам, связанным с покупкой электроэнергии на «балансирующем рынке». Кроме этого, потребность в качественном прогнозировании связана не только с экономическими, но и с

технологическими причинами, т. е. с надежностью электроснабжения. В описанных условиях важной задачей остается вопрос прогнозирования электропотребления.

Решение комплекса задач субъекта оптового рынка связано с планированием электропотребления. К таким задачам относится составление графика суточного электропотребления оптовыми поставщиками, который они должны предоставлять на ОРЭМ. Технологический процесс планирования включает два уровня: первый (основополагающий) – составление планового почасового потребления каждого конечного потребителя; второй – составление прогноза энергосбытовой компании на основе использования данных о прогнозе электропотребления от предприятий первого уровня.

В настоящее время на большинстве промышленных предприятий-абонентов розничного рынка прогнозирование и формирование планового электропотребления производится на основе метода экспертных оценок. Такой метод имеет значительную субъективную составляющую и не может обеспечить требуемую точность прогноза.

Основные этапы экспертной оценки:

1) постановка цели и задач этой оценки (формирование почасового планового электропотребления) в зависимости от целей и влияющих факторов (планового объема продукции, режима работы оборудования, сменности работающих, погодных условий и т. д.);

2) определение группы управления;

3) выбор метода получения экспертной информации, способов обработки;

4) формирование экспертной группы, анкет опроса;

5) экспертиза;

6) обработка, анализ результатов экспертизы, интерпретация результатов;

7) составление отчета [1].

Анализ существующих отдельных методов говорит о том, что электропотребление – процесс случайной природы, который может быть представлен несколькими регулярными и нерегулярными составляющими [4]. Поэтому универсального метода прогноза не существует. В литературе описаны методы, применение которых в конкретных прикладных условиях позволяет достичь максимально возможной точности и достоверности.

Прогнозирование электропотребления является задачей, позволяющей использовать новые сочетания известных методов, а также их различные комбинации. На сегодняшний день существует порядка 200 методов прогнозирования электропотребления, среди которых из наиболее часто применяемых составлено порядка 20 моделей [2].

У конечных абонентов – промышленных предприятий – существует специфика выбора модели прогноза электропотребления в зависимости от энергоемкости (установленной мощности). Интервал прогнозирования определяется компромиссом между точностью прогнозирования и возможностью реализации диспетчером (энергетиком) регулирования работы оборудования (управляющих воздействий по снижению нагрузки) [3].

Существующие методики прогноза электрической нагрузки потребителей, как правило, основываются на статистическом анализе временных рядов потребления электроэнергии. Используется математический аппарат для прогнозирования электропотребления на базе перебора типовых графиков из предыстории (ретроспективных данных), основывающийся на предположении о наличии в предыстории исчерпывающей информации о характерных технологических состояниях объекта. Недостатком данного

подхода является то, что в нем анализируются только внешние для потребителей факторы, влияющие на потребление электроэнергии [5]: температура окружающего воздуха, облачность, долгота дня, день недели, наличие экстраординарных событий, планируемое включение/отключение энергоемких производств, производственный план и др. Подобный подход дает относительно точные результаты только применительно к большим массивам потребителей, например промышленным и жилищно-коммунальным секторам города, нагрузке освещения и т. п. По отношению к отдельному потребителю точность подобного подхода невелика.

Существующие методы основываются на выявлении системных свойств объекта, моделировании закономерностей. При рассмотрении объекта моделирования в учет принимаются масштаб электротехнической системы и характер ее нагрузки.

В электроэнергетической системе прогнозирование служит для планирования энергобалансов в узлах расчетной схемы и сечениях, что обеспечивает устойчивую работу энергосистемы [6]. В случае несоблюдения баланса ухудшается качество электроэнергии. Известно, что отклонение напряжения и частоты от допустимых значений отрицательно сказывается на других элементах электротехнического комплекса – электрооборудовании потребителей. Качество прогноза оптимизирует функционирование электротехнического комплекса, обеспечивает его надежность.

Суммарный заявленный объем субъектов оптового рынка представляет собой заказ на производство электроэнергии, выполнение которого необходимо будет обеспечить. Однако, как показывает практика, заявленных поставщиками данных недостаточно для составления прогноза нагрузки. Предположительно это исправляется посредством применения разных методов и моделей, которые различаются по точности и достоверности [7].

Энергосбытовая компания является посредником между поставщиками и потребителями электроэнергии. В ходе демонополизации и либерализации рынка электроэнергии появилось множество сбытовых компаний – от крупных гарантирующих поставщиков до мелких региональных сбытовых компаний, что привело к росту конкуренции на оптовом и розничном рынках. В сложившейся ситуации у энергосбытовых компаний появились две главные задачи: с одной стороны, обеспечить своих потребителей электроэнергией по оптимальной цене и тем самым удержать их от перехода в другие компании; с другой – в условиях конкуренции поддерживать баланс между закупочной ценой на оптовом рынке и ценой электроэнергии, поставляемой своим потребителям. Системное решение этих задач демонстрирует необходимость использовать новые подходы в управлении энергосбытовой организацией, контролировать распределение, выполнять планирование распределения и покупки электроэнергии [8]. Применение эффективных технологий по планированию повышают конкурентоспособность энергосбытовых компаний.

Промышленные предприятия как конечные потребители также заинтересованы в применении качественной прогнозной модели в условиях ограничения выделяемых ресурсов. Как правило, задача прогнозирования потребления промышленного предприятия решается при комплексном рассмотрении расхода отдельных производственных участков и нормирования энергетических ресурсов предприятия в целом.

Экономическая эффективность потребителя обеспечивается возможностью закупки на оптовом рынке и за счет качественного прогноза. Как показывает международная практика [9], фундаментом целевой модели является конкуренция при обеспечении

надежного энергоснабжения потребителей. Этот принцип лежит в основе модели российского оптового рынка электроэнергии.

В литературе по прогнозированию и управлению в энергетике используется, в соответствии с современной терминологией, следующая классификация интервалов прогнозирования (глубины прогноза) [10, 11]:

оперативный прогноз (от нескольких минут до нескольких часов в пределах текущих суток);

краткосрочный (от одних суток до десяти);

среднесрочный (от месяца до нескольких месяцев);

долгосрочный (от одного года до пяти лет);

перспективный (на несколько лет и более).

Наиболее распространенными и эффективными являются статистические методы прогнозирования, в которых для составления модели используются ретроспективные данные нагрузки за несколько предшествующих лет, имеющие определенный тренд. Прогноз – составление экстраполяции всех зависимостей на последующий год [12].

Существуют общие проблемы, возникающие при прогнозировании с различными подходами и моделями. Первая проблема – это определение необходимых и достаточных параметров для оценки состояния исследуемой предметной области; вторая – возможный переизбыток входных параметров (признаков), который приведет к ограничению быстродействия; третья – наличие феномена «надсистемности». Взаимодействующие системы образуют систему более высокого уровня, обладающую собственными свойствами [8].

Краткосрочный прогноз нагрузки промышленного потребителя – востребованный продукт для возможного управления технологическими процессами производства, составления плановых нагрузок, которые в конечном счете влияют на цену потребленной электроэнергии и себестоимость продукции. По своей природе графики потребления промышленного потребителя весьма различны по причинам масштаба самого производства, наличия того или иного технологического и производственного оборудования, объемов производства, сменности рабочего процесса и др.

Классические методы краткосрочного прогнозирования нагрузки можно разделить на две основные категории: статистические методы и методы искусственного интеллекта [13].

Статистические методы предсказывают суточный график нагрузки в рабочие дни (будни), но из-за негибкости их структуры плохо анализируют нагрузку в праздничные дни и выходные.

Виды статистических методов:

множественная линейная и нелинейная регрессия;

стохастические временные ряды;

общее экспоненциальное сглаживание;

методы пространства состояния и др. [14].

*Методы регрессии* основываются на использовании фактических данных нагрузки в прошлом и чаще всего используются для построения взаимосвязей электропотребления с другими факторами, такими как метеофакторы (температура, длина светового дня и др.), тип дня (рабочий/выходной). Прогноз с применением методов регрессии дает высокую точность для временных рядов с устойчивой периодичностью, равномерностью данных, плавностью и регулярностью циклов без оценки влияющих факторов. На основе качественного теоретического анализа должны быть выявлены наиболее существенные

факторы, влияющие на результирующий признак, для построения множественной регрессии. Модель линейной регрессии описывается уравнением вида

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n + \varepsilon,$$

где  $Y$  – результирующий признак;  $a$  – свободный член уравнения;  $X_1, \dots, X_n$  – факторные признаки;  $b_1, \dots, b_n$  – коэффициенты регрессии;  $\varepsilon$  – ошибка модели.

Ограничением в применении линейных регрессионных моделей являются нелинейные зависимости между фактическими данными электропотребления и коррелирующими экзогенными и социальными факторами. В алгоритме линейной регрессии для динамического процесса с нелинейными связями от метеофакторов не удастся получить точный прогноз.

*Методы временных рядов* основаны на предположении, что данные имеют тенденцию, сезонные изменения, автокорреляцию. К классическим и часто используемым методам временных рядов относят модели:

ARMA (авторегрессия – скользящее среднее);

ARIMA (авторегрессия – интегрированное скользящее среднее);

ARIMAX (авторегрессия – интегрированное скользящее среднее с внешними переменными).

Модель авторегрессии – скользящего среднего (ARMA – autoregressive moving-average model) используется для данных с устойчивой периодичностью и равномерностью данных, т. е. при отсутствии тренда и сезонности. Модель известна силой своей адаптивности. Прогноз является взвешенной суммой всех предыдущих значений ряда. Модель ARMA включает в себя две модели временных рядов: авторегрессии (AR) и скользящего среднего (MA).

Модель скользящего среднего  $q$ -го порядка  $MA(q)$  – модель временного ряда, описываемая уравнением

$$X_t = \sum_{j=1}^q b_j \varepsilon_{t-j},$$

где  $b_j$  – параметры модели ( $b_0 = 1$  без ограничения общности);  $\varepsilon_t$  – белый шум.

Модель ARIMA является модификацией модели ARMA и используется для нестационарных процессов. Метод ARIMAX применяется для процесса, модель которого содержит детерминированную компоненту (тренд и сезонность), случайную составляющую, белый шум [15]. Поэтому метод ARIMAX является наиболее естественным среди классических моделей временных рядов и используется в комбинации с различными интеллектуальными методами.

Модель ARIMA описывают уравнением

$$Y(t) = AR(p) + \alpha_1 X_1(t) + \dots + \alpha_s X_s(t),$$

где  $\alpha_1, \dots, \alpha_s$  – коэффициенты внешних факторов  $X_1(t), \dots, X_s(t)$ .

*Методы, основанные на фильтре Калмана.* Сильное влияние внешних и внутренних факторов диктует необходимость использования вероятностных методов прогнозирования, в которых задействованы различные фильтры для получения непрерывного процесса. Для нестационарных процессов части применим фильтр Калмана [16].

Совместно с линейно-квадратичным регулятором фильтр Калмана позволяет решить задачу линейно-квадратичного гауссовского управления. Вместе с тем метод имеет эпизодическое применение при возникновении в данных объекта динамических режимов.

Оптимальная фильтрация так же нарушится при нестационарности или нелинейности данных исследуемого объекта, что как раз часто характерно для процесса электропотребления. Учет изменчивости характеристик электропотребления требует их дополнительной идентификации, перенастройки фильтра и устранения эффекта расходимости. Результаты сравнения итогов прогнозов методом ARIMA и с применением фильтра Калмана говорят об их идентичности, поэтому принято считать, что эти модели взаимозаменяемы. Совместное использование фильтра Калмана с моделями типа экспоненциального сглаживания повышает точность прогнозирования [17].

Необходимость наличия большого количества статистических данных о процессах изменения параметров относится к общим недостаткам большинства вероятностных способов прогноза. Кроме того, известные методы прогнозирования электропотребления не работают с искаженными или неполными данными.

В ряде источников статистические методы называют вероятностными. Основные принципы их применения – выделение полезного сигнала на уровне шумов, первичная обработка изменяющихся трендов.

В последние годы в электротехнических системах возросла доля нелинейной и несимметричной нагрузки, что в ряде случаев связано с развитием и внедрением у потребителей нового силового оборудования. В связи с этим большинство процессов электропотребления испытывают влияние различных факторов и не могут быть описаны с помощью традиционных статистических моделей, поскольку являются нелинейными, имеют хаотический, квазипериодический либо смешанный характер [8].

Рассмотренные методы математической статистики, теории случайных процессов ограничены статистическими предположениями о свойствах временных рядов. Широкое распространение в прогнозировании электронагрузки получил синергетический подход с описанием рассматриваемых процессов как неоднозначных, многовариантных, нелинейных, с отсутствием устойчивого равновесия, испытывающих динамические изменения характеристик прогнозной модели.

В настоящее время большое внимание уделено, помимо рассмотренных классических методов, нелинейным моделям прогнозирования. Большинство таких методов относится к интеллектуальным методам и эволюционным алгоритмам.

К интеллектуальным методам причисляют экспертные системы, искусственные нейронные сети (ИНС), клеточные автоматы, методы, основанные на теории хаоса, методы группового учета аргументов, опорных векторов и комбинированные методы.

*Метод экспертных оценок* используется для анализа объектов, развитие которых не поддается математической формализации. Неформализованные задачи обычно обладают: неполнотой или противоречивостью исходных данных, неоднозначностью; большой размерностью пространства решения, т. е. перебор при поиске решения весьма велик;

динамически изменяющимися данными и знаниями.

Экспертные системы ориентированы на эвристический поиск решения, а не на исполнение известного алгоритма.

Типовая структура экспертной системы включает блоки [17]:

базу знаний с механизмами рассуждений;

интеллектуальный решатель;

интеллектуальный планировщик;

подсистему объяснения;

интеллектуальный интерфейс с пользователем.

Наиболее значимый элемент в структуре экспертных систем – интеллектуальный решатель, поскольку в нем формально реализован алгоритм рассуждений, приводящий к решению задачи с использованием имеющейся базы знаний. В создании экспертной системы обязательно принимает участие специалист-эксперт в данной области для обеспечения полноты и правильности логических рассуждений.

Экспертные системы применяются в сочетании с другими подходами к прогнозированию, в том числе с классическими, и рассматриваются как подсистемы поддержки принятия решения. К особенностям экспертных систем принадлежат узкая направленность и неспособность к самообучению, что обуславливает сложность обновления правил их функционирования при изменении условий задачи. Кроме того, проблемой является приведение экспертных знаний к виду, обеспечивающему их эффективную машинную реализацию. Адекватным подходом в такой ситуации выступает применение искусственной сети. Искусственные нейронные сети представляют собой нелинейные функции, которые могут выполнять аппроксимации нелинейных зависимостей, способны получать правильные решения задачи при наличии неполных и искаженных данных после настройки параметров (обучения) сети, дают возможность учета большого количества факторов, влияющих на качество прогнозирования, устойчивы к помехам, показывают высокое быстродействие.

Нейронные сети – структуры, основанные на параллельной обработке информации всеми звеньями, которые могут обучаться в процессе работы и обобщать накопленные знания. Интеллектуальная технология нейронных сетей имитирует работу человеческого мозга.

Анализ многослойных нейронных сетей и алгоритмов их обучения позволил выявить недостатки и существующие проблемы:

- 1) необходимость обучения нейронной сети;
- 2) неопределенность в выборе числа слоев и количества нейронных элементов в слое;
- 3) медленная сходимость градиентного метода с постоянным шагом обучения;
- 4) сложность выбора подходящей скорости обучения (маленькая приводит к локальному минимуму, большая может привести к пропуску глобального минимума и сделать процесс обучения расходящимся);
- 5) невозможность определения точек локального и глобального минимума, так как градиентный метод их не различает;
- 6) влияние случайной инициализации весовых коэффициентов ИНС на поиск оптимальной функции (минимума ошибки).

При разработке нейронной сети для целей прогнозирования необходимо решить задачи:

- выбрать архитектуру нейронной сети (число слоев, число нейронов в слоях);
- определить количество и соединение слоев и элементов;
- определить алгоритм (порядок) обучения, функцию активации;
- сформировать обучающую выборку;
- выбрать метод распространения ошибки (прямое, обратное, рекуррентное);
- провести ряд экспериментов с различными конфигурациями, фиксируя при этом лучшую сеть (с наименьшей ошибкой);
- скорректировать архитектуру ИНС (изменить количество слоев и т. п.) в зависимости от получаемого результата (ожидаемого диапазона ошибки).



Для решения задач прогнозирования нагрузок используют сети прямого распространения, самоорганизующиеся, радиально-базисные и вейвлет-нейронные [18].

В каждом конкретном случае архитектура сети подбирается экспериментальным путем с помощью критерия минимальной погрешности прогноза. При недостаточном для решения конкретной задачи размере сети ИНС будет плохо обучаться и неправильно работать; при размере сети, превышающей сложность задачи, процесс обучения будет затягиваться, а сеть станет непригодна для решения задачи. Эффективность разработанной нейронной сети представляется решением задачи оптимизации. Количественная оценка построенной ИНС производится с помощью функции оценки.

Среди применяемых функций оценки абсолютная ошибка прогнозирования (абсолютной процентной погрешности)

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|A_i - A'_i|}{A_i} \cdot 100 \%,$$

где  $A'_i$  – спрогнозированное значение электропотребления;  $A_i$  – фактическое значение электропотребления;  $n$  – количество прогнозируемых значений.

Другой подход к оценке эффективности ИНС – метод наименьших квадратов, который отражает разницу прогнозного значения, полученного на выходе сети, и фактического значения. Данный метод не всегда является наилучшим для выбора оценки, некоторые задачи выдвигают дополнительные требования к получению уровня уверенности выдаваемого результата.

Оптимизация параметров ИНС заключается в минимизации функции ошибки, которая зависит от выборки, структуры ИНС (числа слоев, нейронов, видов функций активации, значения вектора параметров). Функция ошибки может иметь большое число локальных минимумов, для этих случаев есть несколько алгоритмов оптимизации:

- алгоритм стохастической оптимизации (случайный перебор решений);
- алгоритм градиентного спуска.

Сеть прямого распространения считается самой популярной архитектурой ИНС для прогнозирования электрической нагрузки и известна как многослойный персептрон. Радиально-базисная нейронная сеть использует радиальные базисные функции как функции активации и имеет фиксированную структуру с одним скрытым слоем и линейными выходными нейронами. Вейвлет-нейронные сети имеют архитектуру радиально-базисных нейронных сетей с вейвлет-функциями, заключенными в вейвлет-нейронах. Нечеткие нейронные сети – это совокупность элементов произвольной природы с обобщением булевой (двоичной) логики. Генетический алгоритм является рандомизированным, итерационным и эволюционным методом поиска для установления механизма естественного отбора и популяционной генетики, используется для оптимизации весов ИНС с целью преодоления попадания в локальные минимумы погрешности, а также для улучшения точности прогнозов. Роевой интеллект – алгоритм поиска наилучшего решения путем моделирования процесса формирования взаимодействия и соперничества между частицами роя. Клеточный автомат – математическая модель физического процесса, в которой время и пространство дискретны, а все зависимые величины могут принимать конечный набор значений. Метод опорных векторов (SVM – support vector machines) – метод входов/выходов, используемый для задач классификации и регрессионного анализа.

Перечисленные алгоритмы имеют свои достоинства и недостатки, особенности и границы применения.

Сложившимся на сегодня стандартом в прогнозировании считается комбинация из нескольких подходов: при первом используются временные ряды электропотребления за предыдущий период для выявления трендов и циклических составляющих; при втором определяется регрессионная модель, связывающая величину электропотребления с внешними факторами. При применении нейронной сети эти два подхода объединяют.

Анализ работ российских и зарубежных специалистов по краткосрочному прогнозированию электрических нагрузок регионов и крупных промышленных комплексов показывает, что характерной тенденцией в настоящее время является объединение нескольких методов прогнозирования.

Для понимания путей решения задач рассмотрим несколько готовых прогнозных решений с упоминанием объектов прогнозирования (системы электроснабжения региона / сбытовой компании / потребителя), периода прогноза, выбранных гибридных моделей и их особенностей.

#### ***Применение модели нейронных сетей***

Для автоматизированного оперативного прогнозирования электропотребления Костромской области в работе [19] предлагается методика построения модели гибридной нейронной сети, включающей многослойный персептрон, линейную модель, обобщенную регрессионную сеть и два типа радиально-базисных вероятностных сетей.

Для повышения точности планирования оптимального режима электроэнергетической системы Самарской области и достоверности при решении технических и экономических задач разработана модель [20] краткосрочного прогнозирования потребления электроэнергии с использованием трехслойной ИНС прямого распространения и алгоритмом обратного распространения ошибки.

Для краткосрочного прогнозирования потребления электроэнергии Ростовского и Кубанского РДУ внедрена модель [21] с использованием ИНС с переменной структурой, в которой в качестве факторов, влияющих на нагрузку, использованы температура воздуха и естественная освещенность.

В работе [22] составлены два типа моделей оперативного краткосрочного и долгосрочного прогнозирования нагрузки по энергосистеме, относящейся к ОДУ Урала. Прогнозирование потребления осуществляется с помощью ИНС, представляющей собой трехслойный персептрон, во входном слое которого находится 15 нейронов (по количеству энергоузлов), в скрытом 20 и выходном 1. На входы нейронов скрытого и выходного слоев подано смещение. Входными переменными являются значения узловых нагрузок в определенный час суток; в выходном слое – суммарная нагрузка по энергосистеме в этот же час. Количество нейронов в скрытом слое определено по условию минимальной погрешности прогноза.

Использование алгоритма роя частиц (РЧ) описано в статье [23], он применяется для оптимизации структуры при проектировании трехслойной нейронной сети прямой подачи для краткосрочного прогнозирования нагрузки. Экспериментальные результаты показывают, что метод РЧ может увеличить скорость обучения сети и улучшить точность прогнозирования по сравнению с обычным методом обратного распространения. Кроме того, он обеспечивает большую степень точности во многих случаях и дает более низкий процент ошибки краткосрочного прогнозирования.

В работе [24] показаны результаты моделирования суточной и недельной нагрузки для энергосистемы, гибридная модель сочетания РЧ с кластерным анализом может эффективно повысить точность краткосрочного прогнозирования нагрузки. Для кластеризации использована нейронная сеть Эльмана. Этот метод достаточен для обработки нелинейных задач ИНС и содержит в себе интеллектуальный эволюционный метод вычисления.

#### ***Применение модели нейро-нечетких сетей***

Среди моделей нейро-нечетких сетей для краткосрочного прогноза режимов электроэнергетической системы используются нейронные сети с реализацией алгоритма Сугено [25]. Отдельно создаются нечеткие нейронные сети для рабочих и выходных дней. Тип и количество функций принадлежности выбраны на основании минимальной ошибки обучения.

В исследовании [26] с помощью моделей нейро-нечетких сетей решается проблема отбора входных параметров сети модифицированным методом последовательного поиска вперед и методом отбора переменных на основе таблиц корреляции. В качестве входов сети взяты две выборки: первая – почасовые значения нагрузки для двух суток, предшествующих прогнозируемому; вторая – почасовые значения нагрузки для двух суток недельной давности. При обучении сети учитывались рабочие, выходные дни. В выборку входят значения дня недели, прогноза минимальной и максимальной температур.

Автор в [27] предложил модель краткосрочного прогнозирования электропотребления трех энергорайонов операционной зоны Кубанского РДУ с использованием нейро-нечеткой сети и ортогонального вейвлет-преобразования, с выборкой на 25 суток и учетом температуры окружающего воздуха и естественной освещенности.

Рассмотрена методология [28] использования нечеткого логического вывода для уменьшения объемов обучающих выборок почасовых данных в моделях ИНС и снижения ошибки прогнозирования и времени обработки. Учтено влияние различных условных параметров (погоды, времени, случайных возмущений) при прогнозировании нагрузки в условиях нечетких правил. Результаты тестирования показали, что краткосрочное прогнозирование с использованием нечеткой логики при моделировании и прогнозировании электропотребления с учетом влияющих факторов в моделях ИНС имеет большую точность.

Еще одна модель с использованием нейро-нечеткого подхода изложена в работе [29]. В предлагаемом подходе несколько экспертов строят свои собственные нечеткие сети обратного распространения с различных точек зрения для прогнозирования долгосрочной нагрузки в Тайване. Для агрегирования этих долгосрочных прогнозов нагрузки применяется нечеткое пересечение. После этого строится сеть радиальных базисных функций для генерации репрезентативного значения. Эффективность предложенной методологии показана на примере Тайваня.

Среди зарубежных публикаций также отмечается исследование [30] о гибридных интеллектуальных системах для прогнозирования почасовой нагрузки в период до недели, использующих комбинацию искусственной нейронной сети и адаптивной нейро-нечеткой системы. В указанной работе почасовой прогноз нагрузки был выполнен для двух объемов данных (для будней и выходных дней).

### ***Решения с вейвлет-преобразованием***

Модели вейвлет-преобразования применяются в работе [31], где отмечается их преимущество перед многослойной нейронной сетью с прямой связью, состоящее в более высокой способности к обобщению и сходимости. В статье [27], как уже отмечалось, метод вейвлет-преобразования предложен для краткосрочного прогнозирования на основе данных Кубанского РДУ с учетом внешнего фактора (освещенности).

### ***Решения с регрессионными моделями***

Сегодня регрессионные модели эффективно используются для прогноза. Для прогнозирования электропотребления горно-обогатительного комбината (ООО «Сорский ГОК») в исследовании [32] применен метод ARIMA в сочетании с нейронными сетями, теорией реляционных баз данных, принципами системного подхода.

В гибридной модели, описанной в работе [33], задействованы преимущества метода авторегрессии скользящего среднего ARMA для прогнозирования линейной части нагрузки, а метод опорных векторных машин взят для прогнозирования нелинейной части нагрузки.

Из рассмотренных примеров видно, что для выбора оптимального из большого числа методов прогнозирования необходимо знать цель прогноза, интервал, точность прогнозирования, адаптивность модели, оценить ее быстроедействие. В числе актуальных проблем в прогнозе остается учет всех влияющих факторов на этапе постановки задачи, нетиповых дней (праздников, аварий), метеофакторов, неустойчивости ряда методов к шуму. Универсального и удовлетворяющего всем требованиям метода не существует. Создаваемые сегодня гибридные модели – комбинация нескольких методов (как традиционных, так и интеллектуальных).

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Воронов И.В., Политов Е.А. Определение параметров, влияющих на электропотребление промышленного предприятия, с помощью метода экспертных оценок // *Вестник КузГТУ*. 2009. № 5. С. 61–64.
2. Орлов Д.В., Таран А.В., Зиновьев Е.В., Мумладзе Д.Г. Методы прогнозирования электропотребления // *Евразийский союз ученых*. 2015. № 4 (13). С. 168–171.
3. Васильев Д.А., Колоколов М.В., Иващенко В.А. Модели автоматизированного прогнозирования электрических нагрузок промышленных предприятий // *Управление техническими системами и технологическими процессами*. 2011. № 34. С. 254–266.
4. Методика прогнозирования графиков электропотребления для технологий краткосрочного планирования. URL: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/market\\_regulations/schedules.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/market_regulations/schedules.pdf) (дата обращения: 01.06.2021).
5. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А., Колесникова О.В., Захарова А.А. Метод прогнозирования электропотребления промышленного предприятия // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. 2014. Т. 14. № 1. С. 5–13.
6. Билялова А.И. Прогнозирование потребления электрической энергии электротехническим комплексом городской электрической сети. Дисс. ... канд. техн. наук. Ульяновск, 2019. 166 с.

7. Остапченко К.Б., Лисовиченко О.И. Выбор модели прогнозирования электропотребления при решении задачи оперативного суточного планирования поставок электроэнергии на оптовом рынке // *Адаптивные системы автоматического контроля: межвузовский научно-технический сборник*. 2014. № 1 (24). С. 76–86.
8. Тихонов Э.М. Методы прогнозирования в условиях рынка: учебное пособие. Невинномысск: СевКавГТУ, 2006. 211 с.
9. Школьников А.В. Новый поворот // *Энергорынок*. 2007. № 3. С. 16–21.
10. Аполонский О.Ю., Орлов Ю.Н. Сравнительный анализ долгосрочных прогнозов развития мировой энергетики. Часть III // *Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша*. 2013. № 17. 26 с.
11. Бокс Д., Дженкинс Г. Анализ временных рядов: прогноз и управление. М.: Мир, 1974. 406 с.
12. Карандеев Д.Ю. Влияние типов дней на электропотребление города // *Современная техника и технологии*. 2015. № 2. С. 34–40.
13. Gross G., Galiana F.D. Short-term load forecasting // *Proceedings of the IEEE*. 1987. No. 75 (12), pp. 1558–1571.
14. Аль Зихери Б.М. Повышение точности краткосрочного прогнозирования электрической нагрузки потребителей региона с учетом метеофакторов на основе метода опорных векторов. Дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2015. 181 с.
15. Гнатюк В.И., Никитин М.А., Луценко Д.В., Кивчун О.Р. Модели и методы прогнозирования электропотребления при управлении объектами регионального электротехнического комплекса // *Математическое моделирование*. 2017. Т. 29. № 5. С. 109–121.
16. Мызин А.П. Методы и модели прогнозирования для развития электроэнергетических систем в условиях неопределенности и многокритериальности. Дисс. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 1994. 307 с.
17. Абдурахманов А.М., Володин М.В., Зыбин Е.Ю. Методы прогнозирования электропотребления в распределительных сетях (обзор) // *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*. 2016. Vol. 3. No. 1, pp. 3–23.
18. Чернецов В.И., Казаковский Е.Н. Прогнозирование потребления электрической энергии с использованием нейронных сетей // *Надежность и качество: международный сборник научных трудов*. 2006. Т. 1. С. 199–201.
19. Староверов Б.А. Комплексное применение нейронных сетей для автоматизации прогнозирования электропотребления на региональном уровне // *Вестник ИГЭУ*. 2009. Вып. 4. С. 1–4.
20. Алексеева И.Ю. Краткосрочное прогнозирование электропотребления в электроэнергетических системах с использованием искусственных нейронных сетей. Дисс. ... канд. техн. наук. Иваново, 2013. 176 с.
21. Губский С.О. Краткосрочное прогнозирование электропотребления в операционной зоне регионального диспетчерского управления с учетом фактора освещенности. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2012. 23 с.
22. Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б. Краткосрочное прогнозирование электрических нагрузок с использованием искусственных нейронных // *Электричество*. 1999. № 10. С. 6–12.

23. Shayeghi H. STLF based on optimized neural network using PSO // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2009, pp. 4–10.
24. Song Y. Power system short-term load forecasting based on PSO clustering analysis and Elman neural network // *Conf. on simulation, modelling and optimization*. 2005, pp. 268–273.
25. Сердюкова Г.Н., Загайнова А.А., Хмеленко Ю.Ю. Прогнозирование электропотребления с использованием нейро-нечетких сетей. Харьков: Харьковский политехнический институт. С. 229–233.
26. Петрова И.Ю., Глебов А.А. Прогнозирование электропотребления с помощью нейро-нечеткой системы ANFIS // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2006. № 7. С. 3.
27. Надтока И.И., Бугаец В.А. Модель прогнозирования электропотребления энергорайонов на территории операционных зон РДУ с учетом влияния метеофакторов на основе нейро-нечеткой сети и вейвлет-разложения // *Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды IV Международной научно-технической конференции*. Новочеркасск: Лик, 2013. С. 183–186.
28. Rustum M. A fuzzy inference model for short-term load forecasting // *Energy Policy*. 2009. Vol. 37, pp. 1239–1248.
29. Chen T. A collaborative fuzzy-neural approach for long-term load forecasting in Taiwan // *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 63. Iss. 3, pp. 663–670.
30. Ronaldo R.B. Combined artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system for improving a short-term electric load forecasting // *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*. 2007, pp. 779–788.
31. Bashir Z., El-Hawary M.E. Short term load forecasting by using wavelet neural networks // *Electrical and Computer Engineering. Canadian Conference*. 2000, pp. 163–166.
32. Валь П.В., Торопов А.С. Прогнозирование электропотребления с использованием авторегрессионного метода // *Современная техника и технологии: XVI Международная научно-практическая конференция*. Томск: ТПУ, 2009. С. 23–24.
33. Hongzhan N.I. Hybrid of ARIMA and SVMs for short-term load forecasting // *International Conference on Future Energy, Environment and Materials*. 2012, pp. 1455–1460.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Маринова С.В. Прогнозирование электропотребления как сфера системного подхода и экспериментальных решений на базе существующих моделей и методов // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 3 (11). С. 50–65.

**ENERGY FORECASTING AS A SPHERE  
OF SYSTEM APPROACH AND EXPERIMENTAL SOLUTIONS  
ON THE BASED EXISTING MODELS AND METHODS***S.V. Marinova**Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The article describes types and methods of forecasting, models of domestic and foreign solutions.

**Keywords:** electricity forecasting, electricity forecasting methods, electrical load.

**REFERENCES**

1. Voronov I.V., Politov E.A. Determining the parameters affecting to power consumption of industrial enterprise by the expert judgment methods. *Vestnik KuzGTU*. 2009. No. 5, pp. 61–64. (In Russian).
2. Orlov D.V., Taran A.V., Ziniviev E.V., Mumladze D.G. Power consumption forecasting methods. *Evrasiiskiy soyuz uchenuh*. 2015. No. 4 (13), pp. 168–171. (In Russian).
3. Vasiliv D.A., Kolokolov M.V., Ivacshenko V.A. Automated power consumption forecasting models of industrial enterprise. *Upravlenie tehnikeskimi sistemami i tehnologicheskimi processami*. 2011. No. 34, pp. 254–266. (In Russian).
4. Power consumption forecasting method for short-term planning technology. URL: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/market\\_regulations/schedules.pdf](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/laws/market_regulations/schedules.pdf) (date of access: 01.06.2021). (In Russian).
5. Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Kolesnikova O.V., Zaharova A.A. Power consumption forecasting method of industrial enterprise. *Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika*. 2014. Vol. 14. No. 1, pp. 5–13. (In Russian).
6. Biljalova A.I. Electrotechnical complex of the city electrical network power consumption forecasting. Diss. ... Cand. of Techn. Sciences. Ulianovsk, 2019. 166 p. (In Russian).
7. Ostapchenko K.B., Lisovichenko O.I. Choosing a forecasting model when solving the problem of operational daily planning on the EPWM. *Collection of Scientific Works «Adaptive automatic control system»*. 2014. No. 1 (24), pp. 76–86. (In Russian).
8. Tihonov E.M. Forecasting methods in market conditions: training manual. Nevinnomyissk: NCFU, 2006. 211 p. (In Russian).
9. Shkolnikov A.V. New turn. *Energorynok*. 2007. No. 3, pp. 16–21. (In Russian).
10. Apolonskyi O.U., Orlov U.N. Comparative analysis of long-term global energy development. Part III. *Preprints IMP M.V. Keldysh*. 2013. No. 17. 26 p. (In Russian).
11. Box G., Jenkins G. Time series analysis: forecast and control. M.: Mir, 1974. 406 p. (In Russian).
12. Karandeev D.U. Influence of day types on the city electricity consumption. *Sovremennaya tehnika i tekhnologii*. 2015. No. 2, pp. 34–40. (In Russian).
13. Gross G., Galiana F.D. Short-term load forecasting. *Proceedings of the IEEE*. 1987. No. 75 (12), pp. 1558–1571.
14. Al Zihiri B.M. Improving the accuracy of short-term forecasting the electrical load of regional consumers take into account meteorological factors have been used based into support vector machine. Diss. ... Cand. of Techn. Sciences. Novocheerkassk, 2015. 181 p. (In Russian).

15. Gnaryuk V.I., Nikitin M.A., Lucenko D.V., Kivchun O.R. Power consumption forecasting models and methods when regional electrical complex managing. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2017. Vol. 29. No. 5, pp. 109–121. (In Russian).
16. Myzin A.P. Power consumption forecasting models and methods for the development of the electric power systems in conditions of uncertainty and multi-criteria. Diss. ... Doct. of Techn. Sciences. Novosibirsk, 1994. 307 p. (In Russian).
17. Abdurahmanov A.M., Volodin M.V., Zybin E.Y. Power consumption forecasting methods in distribution networks (profile). *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*. 2016. Vol. 3. No. 1, pp 3–23. (In Russian).
18. Chernetsov V.I., Kazakovskiy E.N. Power consumption forecasting using neural networks. *Reliability and Quality: Collection of scientific works*. 2006. Vol. 1, pp. 199–201. (In Russian).
19. Staroverov B.A. Neural networks complex application to automate regional forecasting. *Vestnik IGEU*. 2009. No. 4, pp. 1–4.
20. Alekseeva I.Y. Short-term forecasting in electrical systems using artificial neural networks. Diss. ... Cand. of Techn. Sciences. Ivanovo, 2013. 176 p. (In Russian).
21. Gubskiy S.O. Short-term power consumption forecasting in the operational area of the dispatch control using illumination factor. Diss. ... Cand. of Techn. Sciences. Novocherkassk, 2012. 23 p. (In Russian).
22. Shumilova G.P., Gotman N.E., Startseva T.B. Short-term power consumption forecasting using artificial neural networks. *Electrichestvo*. 1999. No. 10, pp. 6–12. (In Russian).
23. Shayeghi H. STLF based on optimized neural network using PSO. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2009, pp. 4–10.
24. Song Y. Power system short-term load forecasting based on PSO clustering analysis and Elman neural network. *Conf. on simulation, modelling and optimization*. 2005, pp. 268–273.
25. Serdyukova G.N., Zahainova A.A., Hmelenko Y.Y. Power consumption forecasting using neuro-fuzzy networks. Kharkiv: Kharkiv Polytechnic Institute, pp. 229–233. (In Russian).
26. Petrova I.Y., Glebov A.A. Power consumption forecasting using neuro-fuzzy system ANFIS. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman*. 2006. No. 7, pp. 3. (In Russian).
27. Nadtoka I.I., Bugaets V.A. Power consumption forecasting model in control zone using meteo factors based on neuro-fuzzy networks and wavelet decomposition. *Power Engineering by the Eyes of Youth: Collection of Scientific Works of IV International Scientific and Technical Conference*. Novocherkassk: South Russian State Polytechnic University named Platonov, 2013, pp. 183–186. (In Russian).
28. Rustum M. A fuzzy inference model for short-term load forecasting. *Energy Policy*. 2009. Vol. 37, pp. 1239–1248.
29. Chen T. A collaborative fuzzy-neural approach for long-term load forecasting in Taiwan. *Computers & Industrial Engineering*. Vol. 63. Iss. 3, pp. 663–670.
30. Ronaldo R.B. Combined artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system for improving a short-term electric load forecasting. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*. 2007, pp. 779–788.
31. Bashir Z., El-Hawary M.E. Short term load forecasting by using wavelet neural networks. *Electrical and Computer Engineering. Canadian Conference*. 2000, pp. 163–166.
32. Val P.V., Toropov A.S. Power consumption forecasting using autoregressive method. *Modern Technics and Technology: XVI International Scientific and Practical Conference*. 2009, pp. 23–24. (In Russian).



33. Hongzhan N.I. Hybrid of ARIMA and SVMs for short-term load fore-casting. *International Conference on Future Energy, Environment and Materials*. 2012, pp. 1455–1460.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Marinova S.V. Energy forecasting as a sphere of system approach and experimental solutions on the based existing models and methods // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 3(11), pp. 50–65.

УДК 629.7.052

### О ЦЕНТРАХ СИММЕТРИИ ПЛОСКОЙ ВЫПУКЛОЙ ПЛАСТИНЫ

Ал.А. Шум<sup>1</sup>, А.М. Ветошкин<sup>2</sup>, Ан.А. Шум<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

<sup>2</sup>Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана  
(г. Мытищи, Московская область)

© Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А., 2021

**Аннотация.** Рассматривается понятие центра  $n$ -симметрии плоской пластины. Частными случаями  $n$ -симметрии являются  $s$ -симметрия и  $c$ -симметрия (соответственно 0-симметрия и 1-симметрия). Установленный ранее достаточный критерий совпадения центра  $c$ -симметрии плоской выпуклой пластины с началом координат переносится на общий случай  $n$ -симметрии.

**Ключевые слова:** симметрия,  $c$ -симметрия,  $s$ -симметрия,  $n$ -симметрия, центр симметрии, линия полумасс, линия равновесия, функция плотности, масса, центр масс, электрическая машина.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2021-65-72**

#### ВВЕДЕНИЕ

Изготовление и балансировка деталей электрических машин требует ответственного отношения к выбору технологий и методов обработки. При выборе из множества современных технологий механической и физико-технической обработки деталей машин (разнообразие которых описано, например, в работах [1–13]) важно учитывать распределение массы внутри обрабатываемой детали. Существенное значение при этом может иметь наличие в распределении массы той или иной симметрии. Поэтому представляет интерес изучение вопросов симметрии распределения массы внутри деталей машин. При таком изучении рассматриваемые детали могут либо представлять собой объемные тела, либо быть плоскими пластинами. Имеется целый ряд исследований, посвященных изучению разных видов симметрии как плоских, так и объемных деталей. Так, в работах [14–20, 25, 26] изучались вопросы симметрии пластин (плоских деталей), а

в статьях [21–24] рассматривались вопросы симметрии тел (объемных деталей). Настоящая статья продолжает исследования симметрии пластин. В работе [25] был установлен один полезный критерий  $c$ -симметрии для плоской выпуклой пластины. Позже в работе [26] было введено общее понятие  $n$ -симметрии, которое в частном случае при  $n = 1$  совпадает с понятием  $c$ -симметрии. В настоящей статье критерий из работы [25] переносится на общий случай  $n$ -симметрии.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ

Прежде всего напомним основные определения (они приведены в работах [25, 26]).

*Простой областью* называется область плоскости, ограниченная замкнутой линией без самопересечений (граница области считается частью области, таким образом, всякая простая область *замкнута*). Точки простой области, не лежащие на ее границе, являются *внутренними* точками этой области. Простая область называется *выпуклой*, если всякая прямая, проведенная через любую ее внутреннюю точку, пересекает границу данной области ровно в двух точках. Под *областью* понимается простая область или объединение нескольких простых областей. Область  $S_1$  называется *подобластью* области  $S$ , если  $S_1 \subseteq S$ . Простая область  $S$  вместе с определенной в этой области непрерывной неотрицательной функцией (*функцией плотности*) называется *пластиной*  $D$ . Подобласть области  $S$  вместе с соответствующим ограничением функции плотности называется *подпластиной* пластины  $D$  (заметим, что область подпластины, в отличие от области пластины, не обязана быть простой). Пластина  $D$  является *выпуклой*, если выпукла соответствующая ей область  $S$ .

Функцию плотности пластины  $D$  удобно записывать в виде  $f(\varphi, \rho)$ , считая заданной подходящую полярную систему координат (заметим, что при переходе от одной системы координат к другой выражение функции  $f(\varphi, \rho)$  через координаты изменяется, хотя сама функция, как функция точки, остается неизменной).

Если на плоскости заданы прямая  $L$  и пластина  $D$  с областью  $S$  и функцией плотности  $f(\varphi, \rho)$ , то *моментом  $n$ -го порядка пластины  $D$  относительно прямой  $L$*  называется  $M_n(D) = \iint_S (r(\varphi, \rho))^n f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi$ , где  $r(\varphi, \rho)$  – расстояние от точки  $(\varphi, \rho)$  до

прямой  $L$ . Заметим, что значение момента  $M_n(D)$  не зависит от выбора системы координат, поскольку функция  $f(\varphi, \rho)$  и функция  $r(\varphi, \rho)$  при заданной прямой  $L$  являются функциями точки пластины.

Отдельно следует рассмотреть моменты нулевого, первого и второго порядков.

Момент нулевого порядка пластины  $D$  не зависит от прямой  $L$  и равен *массе* пластины  $D$ :  $M_0(D) = \iint_S (r(\varphi, \rho))^0 f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi = \iint_S f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi = m(D)$ .

Момент первого порядка пластины  $D$  относительно прямой  $L$  представляет собой *статический момент* пластины  $D$  относительно прямой  $L$  в смысле традиционного определения [27]:  $M_1(D) = \iint_S r(\varphi, \rho) f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi$ .

Момент второго порядка пластины  $D$  относительно прямой  $L$  представляет собой *момент инерции* пластины  $D$  относительно прямой  $L$  в смысле традиционного определения [27]:  $M_2(D) = \iint_S (r(\varphi, \rho))^2 f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi$ .

Прямая линия называется *линией  $n$ -симметрии пластины*, если она делит данную пластину на две подпластины так, что моменты  $n$ -го порядка этих подпластин относительно рассматриваемой прямой одинаковы. Как следует из определений статьи [16], линии 0-симметрии пластины – это *линии полумасс* (они делят пластину на подпластины одинаковой массы), а линии 1-симметрии – это *линии равновесия* (они делят пластину на подпластины с равными статическими моментами; напомним, что пластина, положенная на лезвие бритвы вдоль такой прямой, сохранит равновесие). Линии 2-симметрии пластины – это прямые, которые делят пластину на две подпластины с равными моментами инерции.

Точка пересечения всех линий  $n$ -симметрии пластины называется *центром  $n$ -симметрии данной пластины*. Таким образом (в силу определений из статьи [16]), центр 0-симметрии пластины – это ее центр  *$s$ -симметрии (центр полумасс)*, а центр 1-симметрии пластины – это ее *центр  $c$ -симметрии (центр масс)*. Как было установлено в работах [14, 15], центр 1-симметрии всегда существует, в то время как центр 0-симметрии может не существовать. Там же было показано, что в случае, когда существуют оба эти центра симметрии, они могут не совпадать.

В работе [25] доказан достаточный критерий совпадения центра  $c$ -симметрии плоской выпуклой пластины с началом координат. Следующая лемма распространяет этот критерий на общий случай  $n$ -симметрии (напомним, что функция угла  $\varphi$  называется *полярно симметричной*, если она имеет период  $\pi$ ; значения такой функции для углов  $\varphi$ , определяющих в рамках полярной системы координат противоположные направления, одинаковы).

**Лемма.** Пусть начало координат полярной системы является внутренней точкой некоторой выпуклой области  $S$  пластины  $D$  с функцией плотности  $f(\varphi, \rho)$ ,  $r(\varphi)$  – расстояние от начала координат до границы этой области вдоль луча, определяемого

углом  $\varphi$ , и функция  $F_n(\varphi) = \int_0^{r(\varphi)} f(\varphi, \rho) \rho^{n+1} d\rho$  является полярно симметричной. Тогда

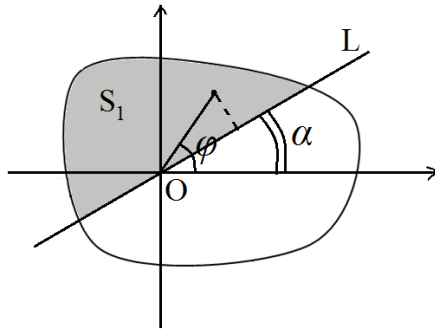
пластина  $D$  имеет центр  $n$ -симметрии в начале координат.

**Доказательство.** Пусть выполнены условия леммы и прямая  $L$ , проведенная через начало координат под углом  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha < \pi$ ) к горизонтальной оси, делит пластину  $D$  на две подпластины –  $D_1$  и  $D_2$  – с областями  $S_1$  и  $S_2$  соответственно. Тогда вычисление момента  $n$ -го порядка пластины  $D_1$  относительно прямой  $L$  будет выглядеть так (рисунок а):

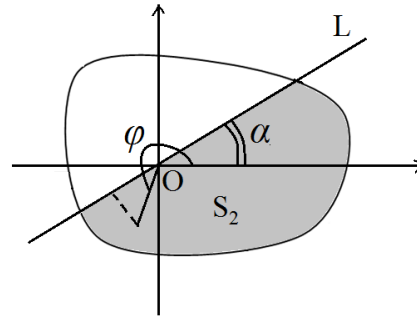
$$\begin{aligned} M_n(D_1) &= \iint_{S_1} (r(\varphi, \rho))^n f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi = \iint_{S_1} (\rho \sin(\varphi - \alpha))^n f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi = \\ &= \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} d\varphi \int_0^{r(\varphi)} \rho^n \sin^n(\varphi - \alpha) f(\varphi, \rho) \rho d\rho = \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} \sin^n(\varphi - \alpha) d\varphi \int_0^{r(\varphi)} f(\varphi, \rho) \rho^{n+1} d\rho = \\ &= \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} \sin^n(\varphi - \alpha) F_n(\varphi) d\varphi. \end{aligned}$$

Вычисление момента  $n$ -го порядка пластины  $D_2$  относительно прямой  $L$  выглядит похожим образом (рисунок б), причем на заключительном его этапе используется полярная симметрия функции  $F_n(\varphi)$ :

$$\begin{aligned}
 M_n(D_2) &= \iint_{S_2} (r(\varphi, \rho))^n f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi = \iint_{S_2} (\rho \sin(\varphi - \alpha))^n f(\varphi, \rho) \rho d\rho d\varphi = \\
 &= \int_{\alpha+\pi}^{\alpha+2\pi} d\varphi \int_0^{r(\varphi)} \rho^n \sin^n(\varphi - \pi - \alpha) f(\varphi, \rho) \rho d\rho = \int_{\alpha+\pi}^{\alpha+2\pi} \sin^n(\varphi - \pi - \alpha) d\varphi \int_0^{r(\varphi)} f(\varphi, \rho) \rho^{n+1} d\rho = \\
 &= \int_{\alpha+\pi}^{\alpha+2\pi} \sin^n(\varphi - \pi - \alpha) F_n(\varphi) d\varphi = \left\{ \begin{array}{l} t = \varphi - \pi \\ \varphi = t + \pi \\ d\varphi = dt \end{array} \right. = \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} \sin^n(t - \alpha) F_n(t + \pi) dt = \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} \sin^n(t - \alpha) F_n(t) dt.
 \end{aligned}$$



а



б

К вычислению момента: а –  $M_n(D_1)$ ; б –  $M_n(D_2)$

Таким образом, моменты  $M_n(D_1)$  и  $M_n(D_2)$  оказались одинаковы. Поскольку  $L$  представляет собой прямую, произвольно проведенную через начало координат, следовательно, всякая прямая, проходящая через начало координат, делит пластину  $D$  на две подпластины, имеющие равные моменты  $n$ -го порядка. Это в свою очередь означает, что начало координат является центром  $n$ -симметрии пластины  $D$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Доказанный критерий имеет своим частным случаем лемму 2 из работы [25] (утверждение этой леммы получается при  $n = 1$ ). В случае когда  $n = 0$ , этот достаточный критерий оказывается также и необходимым (это утверждает лемма 1 из работы [25]). Между тем в общем случае установленный достаточный критерий необходимым не является (это подтверждает рассмотренный в работе [25] пример с правильным однородным треугольником). Тем не менее этот достаточный критерий может иметь полезные применения (пример применения критерия при  $n = 1$  также рассмотрен в работе [25]).

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

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*ШУМ Александр Анатольевич* – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: shum@tstu.tver.ru

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

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

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

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.

---

#### ON THE CENTERS OF SYMMETRY OF A FLAT CONVEX PLATE

*Al.A. Shum<sup>1</sup>, A.M. Vetoshkin<sup>2</sup>, An.A. Shum<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Tver State Technical University (Tver)*

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

**Abstract.** The concept of the center of  $n$ -symmetry of a flat plate is considered. Special cases of  $n$ -symmetry are  $s$ -symmetry and  $c$ -symmetry (0-symmetry and 1-symmetry, respectively). The previously established sufficient criterion for the coincidence of the center of  $c$ -symmetry of a flat convex plate with the origin is transferred to the general case of  $n$ -symmetry.

**Keywords:** symmetry,  $c$ -symmetry,  $s$ -symmetry,  $n$ -symmetry, center of symmetry, half-mass line, equilibrium line, density function, mass, center of mass, electric machine.

#### REFERENCES

1. Artamonov B.A., Volkov Yu.S., Drozhzhhalova V.I., Sedykhin F.V., Smolentsev V.P., Yampolsky V.M. Elektrofizicheskie i elektrohimicheskie metody obrabotki materialov [Electrophysical and electrochemical methods of processing materials]: manual. In 2 v. M.: Vysshaja 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]. M.: Mashinostroenie, 1993. 336 p.
3. Voronichev N.M., Tartakovskiy J.E., Genin V.B. Avtomaticheskie linii iz agregatnyh stankov [Automatic lines of modular machines]. M.: Mashinostroenie, 1979. 487 p.
4. Dalskiy A.M., Gavrilyuk V.S. Mekhanicheskaya obrabotka materialov [Mechanical treatment of materials]: college textbook. M.: 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 reguliruyemye i kombinirovannye processy rezaniya [Automatically adjustable and combined cutting processes]. M.: Mashinostroenie, 1977. 303 p.
7. Silin S.S. Metod podobiya pri rezanii materialov [Method of similarity when cutting materials]. M.: 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]. M.: Mashinostroenie, 1989. 297 p.
9. Trent E.M. Rezanie metallov [Metal cutting]. M.: Mashinostroenie, 1980. 263 p. (In Russian).
10. Uchastki dlya elektroerozionnoy obrabotki rabochih detalej vyrubnyh shtampov i press-form [Areas for electrical discharge machining of working parts of cutting dies and molds]: design guidelines. M.: ONTI ENIMS, 1983. 47 p.
11. Etin A.O. Kinematicheskij analiz i vybor effektivnyh metodov obrabotki lezvijnym instrumentom [Kinematic analysis and selection of effective methods of processing with a climbing tool]. M.: Mashgiz, 1953. 173 p.
12. Yanushkin A.S., Shorkin V.S. Kontaktnye processy pri elektroalmaznom shlifovanii [Contact processes in electro-diamond grinding]. M.: 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 Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. The symmetric line of a regular homogeneous triangle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo 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. Pismennyi D.T. Lecture notes on higher mathematics (full course). M: AIRIS PRESS, 2007. 604 p.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*SHUM Alexander Anatolievich* – Associate Professor of the Department of Mathematics, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: shum@tstu.tver.ru

*VETOSHKIN Alexander Mikhailovich* – Associate Professor in the Department of Applied Mathematics, Informatics and Computer Engineering, MF Moscow 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, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A. On the centers of symmetry of a flat convex plate // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 3 (11), pp. 65–72.



**ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ**

УДК: 666.97

**РЕГУЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ТРЕХФАЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ,  
ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ****В.В. Белов***Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., 2021

**Аннотация.** В работе рассмотрена связь реологических свойств трехфазных дисперсных систем с капиллярным сцеплением и по результатам анализа обоснована возможность направленного регулирования реологических свойств сырьевых смесей для производства строительных материалов. Показано, что реологические свойства двухфазных дисперсных систем определяются главным образом действием межмолекулярных сил в заполненных жидкостью зонах контакта частиц твердой фазы, а в трехфазных системах – действием сил капиллярного сцепления.

**Ключевые слова:** реологические свойства, двухфазные системы, трехфазные системы, дисперсные системы, регулирование, капиллярное сцепление.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2021-73-78**

Сырьевые смеси, применяемые в производстве многих строительных материалов, представляют собой структурированные дисперсные системы, которые относятся к классу упруговязкопластичных материалов. Знание реологических характеристик сырьевых смесей имеет большое значение, так как оптимальные показатели этих характеристик необходимы для успешной работы технологического и транспортного оборудования, восприятия температурных напряжений в процессе тепловой обработки и т. п. При этом как технологические, так и эксплуатационные параметры определяются состоянием структуры изучаемого материала [1].

Целью данной работы являлось установление связи реологических свойств трехфазных дисперсных систем с капиллярным сцеплением и обоснование возможности направленного регулирования реологических свойств сырьевых смесей для производства строительных материалов.

Реологические характеристики твердообразных дисперсных систем определялись методом пенетрационного реометра (вискозиметра) ПРБ-2 [2] с помощью основного уравнения:

$$\tau = \frac{KP \cdot 1000}{h^2} = \tau_0 + \eta \frac{K_1 V_k}{h},$$

где  $\tau$  – действующее напряжение сдвига, кПа;  $K$  и  $K_1$  – коэффициенты, зависящие от угла при вершине конуса;  $P$  – нагрузка, действующая на конус, Н;  $h$  – глубина погружения конуса, мм;  $\tau_0$  – предельное напряжение сдвига, кПа;  $\eta$  – пластическая вязкость, кПа · с;  $V_k$  – скорость погружения конуса, мм/с.

Зависимости предельного напряжения сдвига уплотненного молотого песка с удельной поверхностью  $196 \text{ м}^2/\text{кг}$  от влажности при постоянной пористости показывают, что при увеличении влажности предельное напряжение сдвига сначала растет, достигает максимума при определенной влажности, а затем уменьшается (рис. 1). Как показано в работе [3], такой же характер носит и изменение капиллярного сцепления в этой системе, обусловленное влажностью, причем, как оказалось, значения влажности  $W_{\text{мс}}$ , соответствующие максимумам разрывной прочности (капиллярного сцепления) и предельного напряжения сдвига для молотого песка с одинаковой удельной поверхностью, независимо от пористости системы совпадают. Следовательно, предельное напряжение сдвига трехфазных дисперсных систем определяется в основном капиллярным сцеплением и отражает его действие. Зависимости вязкости уплотненного молотого песка от влажности имеют аналогичный характер. Вместе с тем, поскольку величина пластической вязкости зависит не только от сил сцепления, но и от коэффициента внутреннего трения, который с увеличением влажности системы монотонно снижается, максимум вязкости дисперсных систем наблюдается при влажности, меньшей влажности  $W_{\text{мс}}$ .

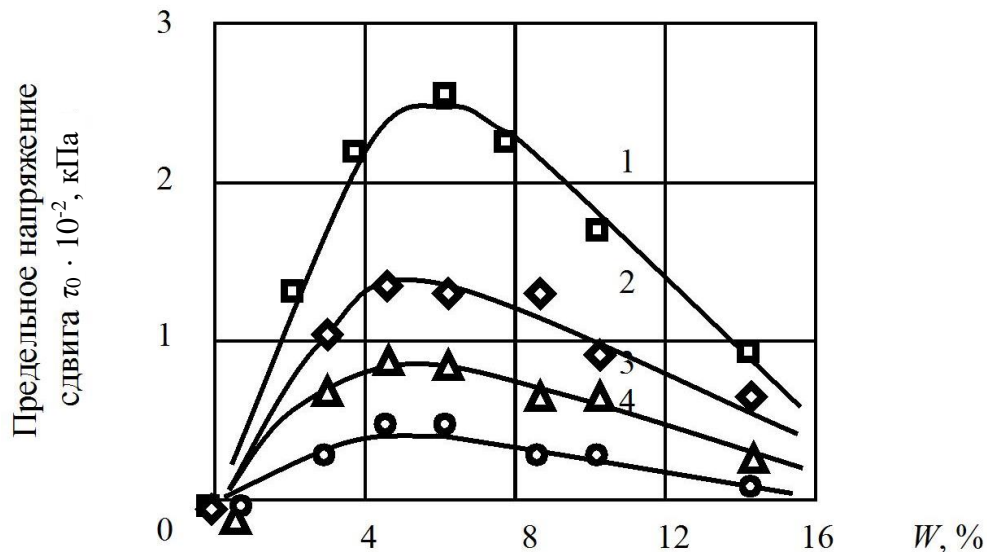


Рис. 1. Предельное напряжение сдвига в уплотненном молотом песке с удельной поверхностью  $196 \text{ м}^2/\text{кг}$  в зависимости от влажности  $W$ :  
1 – пористость 42 %; 2 – 46 %; 3 – 50 %; 4 – 54 %

Реологические свойства двухфазных дисперсных систем определяются главным образом действием межмолекулярных сил в заполненных жидкостью зонах контакта частиц твердой фазы, а в трехфазных системах – действием сил капиллярного сцепления. Если в первом случае на величину сил взаимодействия между твердыми частицами оказывает влияние адсорбция поверхностно-активных веществ (ПАВ) на их поверхности, то на капиллярное сцепление в трехфазных системах воздействуют величина поверхностного натяжения дисперсионной среды  $\sigma$  и степень смачивания ею частиц твердой фазы, характеризуемая краевым углом смачивания  $\Theta$ . Уменьшение величины поверхностного натяжения может быть достигнуто введением в состав воды затворения ПАВ, которыми являются, в частности, пластификаторы и суперпластификаторы [4].

В данной работе изучалось влияние различных химических добавок, изменяющих поверхностное натяжение дисперсионной среды и ее смачивающую способность твердой фазы, на реологические характеристики модельных дисперсных систем – молотого песка с удельной поверхностью  $298 \text{ м}^2/\text{кг}$ , а также смеси того же молотого песка и Вольского песка естественной дисперсности при соотношении 1:3. Песок затворялся водой, водными растворами химических добавок (сульфитно-спиртовой барды (ССБ); высокомолекулярного жирного спирта (ВЖС); суперпластификатора С-3), а также керосином. Значения поверхностного натяжения жидкости, измеренные способом наибольшего давления газового пузырька были следующими:  $7,2 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$  (вода);  $7,2 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$  (0,5%-й раствор С-3);  $6,24 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$  (0,5%-й раствор ССБ);  $5,3 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$  (0,3%-й раствор ВЖС);  $3 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$  (керосин). В соответствие со снижением смачивающей способности, определенной по скорости капиллярного поднятия жидкости в трубке, заполненной песком, эти добавки образовали следующий ряд: ВЖС, ССБ и С-3.

Рис. 2 показывает, что предельное напряжение сдвига с уменьшением поверхностного натяжения жидкости при ее одинаковом содержании в дисперсной системе снижается. Аналогичные результаты получены при затворении жидкостями с различным поверхностным натяжением бинарной смеси молотого и Вольского песка, моделирующей смесь вяжущего и заполнителя в момент ее затворения водой. Уменьшение предельного напряжения сдвига этих систем, затворенных раствором С-3, имеющим равное с водой поверхностное натяжение, объясняется снижением смачивающей способности твердой фазы данным раствором.

Из полученных данных о влиянии поверхностного натяжения жидкости и краевого угла смачивания на предельное напряжение сдвига дисперсных систем следует, что их прочность при сдвиге имеет капиллярную природу. Изменяя указанные физико-химические характеристики, например при помощи химических добавок, можно эффективно воздействовать на величину капиллярного сцепления и связанные с ним реологические свойства дисперсных систем, применяемых для производства строительных материалов. С этой точки зрения представляет практический интерес выяснение эффективности действия химических добавок в трехфазных и двухфазных дисперсных системах.

На рис. 3 показаны значения влажности (водотвердого отношения) бинарной модельной системы (смеси молотого и Вольского песка в соотношении 1:3) в трехфазном состоянии, необходимые для получения при постоянной плотности образцов по сухому веществу  $1,8 \text{ г/см}^3$  величины предельного напряжения сдвига  $\tau_0 = 220 \text{ кПа}$ , и той же системы в двухфазном состоянии (для получения величины предельного напряжения сдвига  $\tau_0 = 50 \text{ кПа}$ ).

Анализ приведенных данных показывает, что химические пластифицирующие добавки необходимо разделять на эффективные в двухфазных, трехфазных системах и универсальные и в тех и в других. Так, добавка ВЖС является самой действенной (из сравниваемых) для трехфазных систем, так как снижает в наибольшей степени предельное напряжение сдвига в них. Если та же система становится двухфазной, то введение ВЖС не снижает, а увеличивает предельное напряжение сдвига в системе. Остальные две добавки – ССБ и С-3 – являются универсальными. Они увеличивают пластичность как двух-, так и трехфазных систем. Указанные особенности действия добавок связаны с их физико-химическими свойствами и природой сил межчастичного взаимодействия. Добавка ВЖС снижает поверхностное натяжение дисперсионной среды и тем самым уменьшает силы

капиллярного сцепления в трехфазных системах. В то же время, увеличивая смачиваемость твердой фазы дисперсионной средой, добавка ВЖС приводит к возрастанию количества связанной жидкости, что повышает предельное напряжение сдвига двухфазной системы. Добавки ССБ и С-3 уменьшают силы капиллярного сцепления в трехфазных системах и межчастичное взаимодействие в двухфазных системах вследствие понижения смачивающей способности дисперсионной среды.

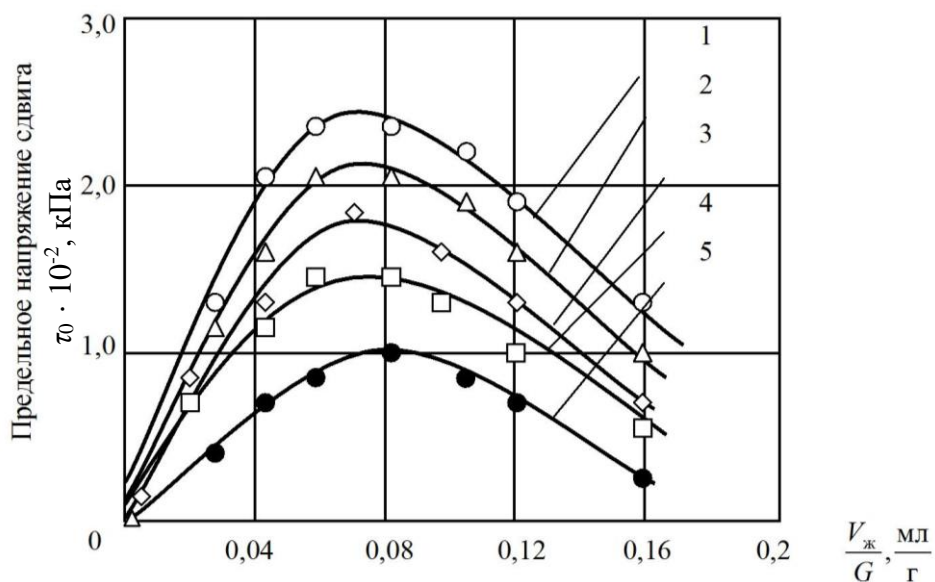


Рис. 2. Предельное напряжение сдвига в молотом песке с удельной поверхностью  $298 \text{ м}^2/\text{кг}$  при пористости 46 % в зависимости от количества жидкой фазы: 1 – вода; 2 – 0,5%-й раствор ССБ; 3 – 0,5%-й раствор С-3; 4 – 0,3%-й раствор ВЖС; 5 – керосин

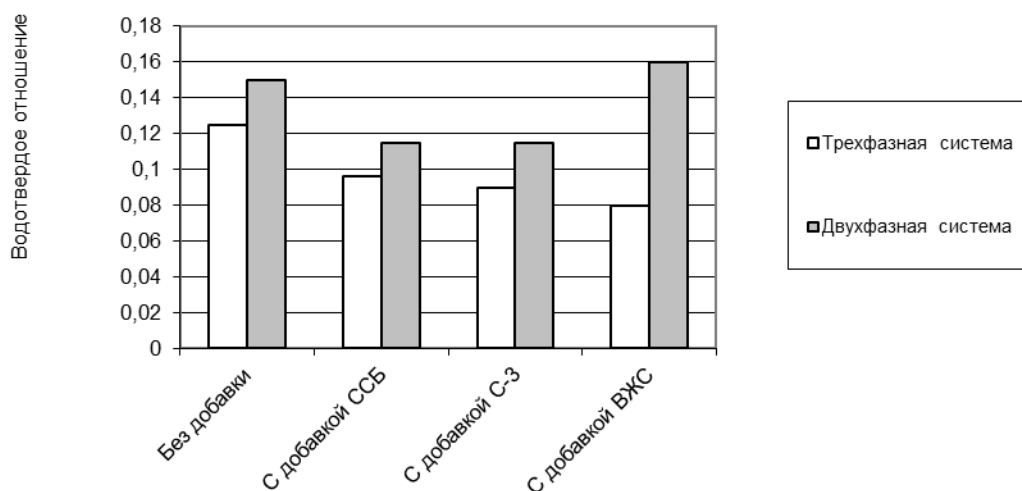


Рис. 3. Водотвердое отношение смеси молотого и Вольского песка в соотношении 1:3, необходимое для получения  $\tau_0 = 220 \text{ кПа}$  в трехфазном состоянии и  $\tau_0 = 50 \text{ кПа}$  в двухфазном состоянии, в зависимости от вида химической добавки при их постоянной концентрации в воде затворения

Учет особенностей действия химических добавок в двухфазных и трехфазных системах и раскрытие его механизма позволят целенаправленно выбирать наиболее эффективные добавки в зависимости от требований технологии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобрышев А.Н., Соломатов В.И., Авдеев Р.И., Козомазов В.Н., Корвяков В.Г. Структурно-топологические особенности кинетических процессов // *Вестник отделения строительных наук РААСН*. 2000. Вып. 3. С. 109–114.
2. Берней И.И., Белов В.В., Сафонов А.А. Пенетрационный реометр для исследования и контроля реологических свойств мелкозернистых дисперсных систем // *Ускорение научно-технического прогресса в промышленности строительных материалов и строительной индустрии*. Белгород: БТИСМ, 1987. С. 23.
3. Белов В.В. Капиллярная аутогезия в трехфазных сырьевых смесях // *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2018 году*. М.: РААСН, 2019. С. 58–68.
4. Folliard K.J., Berke N.S. Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixtures // *Cem. Concr. Res.* 1997. Vol. 27. No. 9, pp. 1357–1364.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

*БЕЛОВ Владимир Владимирович* – советник РААСН, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В. Регулирование реологических свойств трехфазных дисперсных систем, применяемых для производства строительных материалов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 3 (11). С. 73–78.

---

## REGULATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES THREE-PHASE DISPERSE SYSTEMS USED FOR THE PRODUCTION OF CONSTRUCTION MATERIALS

*V.V. Belov*

*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The work considers the connection of rheological properties of three-phase disperse systems with capillary adhesion and on this basis the possibility of directional regulation of rheological properties of raw mixtures for production of building materials is justified. It is shown that rheological properties of two-phase disperse systems are determined mainly by action of intermolecular forces in liquid-filled contact zones of solid phase particles, and in three-phase systems – by action of capillary adhesion forces.

**Keywords:** rheological properties, two-phase systems, three-phase systems, disperse systems, regulation, capillary adhesion.

**REFERENCES**

1. Bobryshev A.N., Solomatov V.I., Avdeev R.I., Kozomazov V.N., Korvyakov V.G. Structural and topological features of kinetic processes. *Bulletin of the Department of Construction Sciences of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences*. 2000. Iss. 3, pp. 109–114. (In Russian).
2. Bernay I.I., Belov V.V., Safonov A.A. Penetration rheometer for research and control of rheological properties of fine-grained disperse systems. *Accelerating Scientific and Technological Progress in the Industry of Building Materials and the Construction Industry*. Belgorod: BTISM, 1987, p. 23. (In Russian).
3. Belov V.V. Capillary autogeziya in in three-phase raw stocks. *Fundamental, Search and Applied Studies of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences on Scientific Support for the Development of Architecture, Urban Planning and the Construction Industry of the Russian Federation in 2018*. M.: RAABS, 2019, pp. 58–68. (In Russian).
4. Folliard K.J., Berke N.S. Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixtures. *Cem. Concr. Res.* 1997. Vol. 27. No. 9, pp. 1357–1364.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

*BELOV Vladimir Vladimirovich* – Adviser of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures Production, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Belov V.V. Regulation of rheological properties three-phase disperse systems used for the production of construction materials // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 3 (11), pp. 73–78.

УДК 615.014.67

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИСАХАРИДНЫХ КАПСУЛ  
ДЛЯ ЛЕКАРСТВЕННЫХ ФОРМ  
НА ОСНОВЕ ВОДНЫХ ЭКСТРАКТОВ МОРСКИХ ВОДОРОСЛЕЙ**

*И.И. Карпенко, О.В. Манаенков, К.О. Ильина, В.П. Молчанов*  
*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Карпенко И.И., Манаенков О.В.,  
Ильина К.О., Молчанов В.П., 2021

**Аннотация.** Целью работы является создание способов получения полисахаридных капсул на основе водных экстрактов морских водорослей для последующей разработки лекарственных форм и продуктов питания повышенной аутентичности и биологического качества, соответствующих современному уровню знания о роли питания в сохранении здоровья и отвечающих требованиям потребительского рынка. В статье представлен краткий анализ научно-технической литературы, посвященный вопросам получения инкапсулированных форм нутриентов, которые могут быть использованы при создании

функциональных продуктов питания. Рассмотрены основные методы и методики микрокапсулирования и описаны результаты проведения поисковых экспериментов по определению гелеобразующей способности геля ламинарии и альгината натрия, а также по исследованию процесса растворения таблеток с разным покрытием в режимах, имитирующих условия желудка и кишечника.

**Ключевые слова:** биополимеры, биологически активные вещества, иммобилизация, инкапсулирование, лекарственные формы, полисахаридные капсулы, морские водоросли.

**DOI: 10.46573/2658-7459-2021-78-105**

### ВВЕДЕНИЕ

Микрокапсулирование – это процесс заключения мелких частиц вещества в тонкую оболочку пленкообразующего материала, в результате которого получают продукт в виде отдельных микрокапсул размером от долей микрона до сотен микрон. Инкапсулируемое вещество, называемое содержимым микрокапсул, активным, или основным, веществом, образует ядро микрокапсул, а капсулирующий материал составляет материал оболочек. Оболочки выполняют функцию разобщения частиц одного или нескольких веществ друг от друга или от внешней среды до момента использования.

Основной компонент микрокапсул – инкапсулируемое вещество – может находиться в любом агрегатном состоянии (жидком, твердом или газообразном). Существующие методы обеспечивают возможность инкапсулирования как лиофильных, так и лиофобных материалов.

Микрокапсулирование в ряде областей позволяет достигать качественно новых эффектов. Общим для этого технологического направления можно назвать то, что получаемые продукты представляют собой отдельные микрочастицы химических веществ с новыми свойствами и то, что их получение оказывается возможным благодаря использованию гелеобразующих полимерных материалов.

Области применения инкапсулированных продуктов чрезвычайно многочисленны. Сегодня трудно назвать отрасль хозяйства, где микрокапсулы не нашли бы применения или эффективность их использования не была бы ясно или принципиально показана. Это определяет высокие темпы развития новой технологии.

В настоящее время в литературе насчитывается несколько тысяч патентов, рекламных описаний продуктов и процессов, научных сообщений и другой информации о получении и использовании инкапсулированных веществ.

Микрокапсулирование как принцип создания систем направленной доставки и защиты веществ широко применяют в производстве различных продуктов и препаратов. Это фармацевтические средства программированного и пролонгированного действия, обеспечивающие защиту от воздействия желудочного сока при пероральном применении полипептидов, вакцин и других препаратов, а также системы для парентерального введения в биodeградируемой оболочке; средства агрокультуры (пестициды, феромоны); химические продукты различных целевых назначений (красители для безуглеродной копировальной бумаги, тонеры, антипирены для полимерных композиций, анаэробные герметики); пищевые и кормовые биоактивные добавки; компоненты косметических средств и др. Заключение, как правило, в полимерную оболочку микрочастицы твердых и жидких веществ придает известным химическим и фармацевтическим продуктам, биологически активным объектам совершенно новые качества.

Научный и практический интерес к проблеме микрокапсулирования остается высоким, о чем свидетельствует обширная литература по этой теме в виде монографий, книг и периодических изданий.

Целью представленной работы является создание способов получения полисахаридных капсул для лекарственных форм на основе водных экстрактов морских водорослей *Laminaria*.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методы микрокапсулирования могут быть разделены на три основные группы:

1) физико-химические – включают коацервацию, осаждение нерастворителем, образование новой фазы при изменении температуры, упаривание летучего растворителя, отверждение расплавов в жидких средах, экстракционное замещение, высушивание распылением, физическую адсорбцию;

2) химические – образование новой фазы путем сшивания полимеров, поликонденсация и полимеризация;

3) физические методы – напыление в псевдооживленном слое, экструзия и конденсация паров.

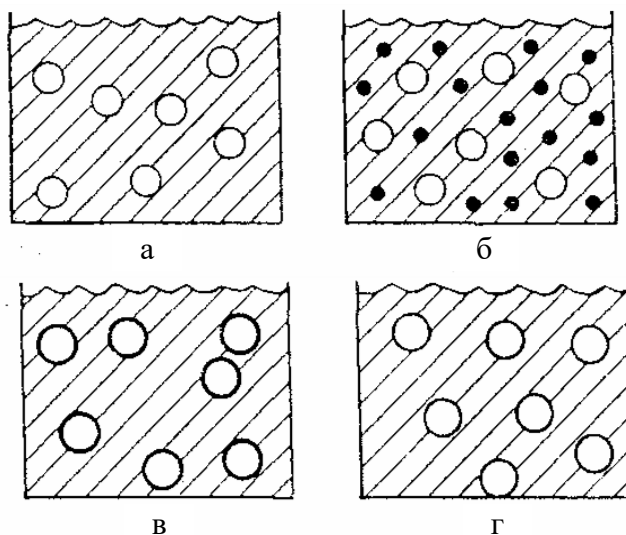
Классификация, в основу которой положена природа процессов, протекающих при микрокапсулировании, достаточно условна. На практике часто используется сочетание различных методов. Кроме перечисленных, стоит еще упомянуть о методе аэрозольного микрокапсулирования, который можно отнести и ко второй, и к третьей группе, поскольку в его основе могут лежать как химические процессы, так и явления физической коалесценции частиц.

При определении наиболее пригодного метода для каждого конкретного случая исходят из заданных свойств конечного продукта, стоимости процесса и т. д. Однако главным образом выбор метода обусловлен свойствами исходного капсулируемого вещества.

Из физико-химических методов широко применяют первые четыре, отличающиеся простотой аппаратного оформления, высокой производительностью и хорошей воспроизводимостью результатов [1]. Эти методы основаны на фазовом разделении жидкость-жидкость, заключающемся в выделении из раствора пленкообразующего материала фазы, обогащенной этим материалом, при изменении температуры или pH раствора, добавлении нерастворителя или в процессе испарения растворителя. Процесс микрокапсулирования методом разделения фаз можно условно разделить на четыре стадии (рисунок).

Первая стадия заключается в создании двухфазной системы, состоящей из диспергированного капсулируемого вещества в растворе пленкообразующего материала. На второй стадии образуется трехфазная система, состоящая, помимо диспергированной фазы капсулируемого вещества, еще из двух фаз, находящихся в равновесии, одна из которых обогащена пленкообразующим материалом. На третьей стадии обогащенная фаза, выделившаяся в виде мелких капель или флоккул, обволакивает частицы мелкодисперсной капсулируемой фазы с образованием вокруг этих частиц непрерывной тонкой пленки. На заключительной стадии образовавшаяся пленка затвердевает, микрокапсулированный продукт отделяется.





Схематическое изображение дисперсной системы на различных стадиях микрокапсулирования методом разделения фаз:  
а – эмульсия (дисперсия) капсулируемого вещества в растворе пленкообразующего материала; б – стадия образования новой фазы, обогащенной пленкообразующим материалом; в – стадия образования микрокапсул; г – стадия обезвоживания оболочек

Процесс фазового разделения может быть осуществлен как в водной среде, так и в органических растворителях. В водной среде диспергируемым (капсулируемым) веществом является масло или твердое нерастворимое в воде вещество. Капсулирующий материал в данном случае водорастворим.

Один из первых разработанных способов микрокапсулирования основан на явлении коацервации [2]. В качестве пленкообразующего материала в этом случае используют высокомолекулярные коллоидные вещества. Исходная коацервационная система может содержать одно высокомолекулярное коллоидное вещество (простая коацервация) или два (сложная коацервация). Простую коацервацию вызывают добавлением неорганических солей или других лиофильных веществ и изменением температуры или разбавлением системы, а сложную – последними двумя факторами или изменением pH.

Для микрокапсулирования в расплавах капсулируемое вещество вместе с расплавом полимера диспергируют в жидкости, нелетучие при температуре плавления пленкообразующего материала. Образование микрокапсул происходит при условии смачивания частиц капсулируемого вещества фазой расплава и в результате отверждения расплава при понижении температуры.

Сущность способа высушивания распылением заключается в разбрызгивании дисперсии капсулируемого вещества в растворе пленкообразующего материала потоком нагретого газа носителя в специальных аппаратах. Получаемые мелкие капли затвердевают в результате удаления растворителя и отверждения оболочек микрокапсул [3].

Удаление растворителя из оболочек микрокапсул может быть достигнуто как испарением, так и обработкой другой жидкостью, смешивающейся с растворителем, но не растворяющей пленкообразующий материал. На этом принципе основан метод экстракционного замещения.

Химические методы микрокапсулирования включают сшивание высокомолекулярных веществ полифункциональными агентами и поликонденсацию на поверхности капсулируемых частиц. При микрокапсулировании твердых частиц этими методами обычно предварительно прививают инициатор полимеризации на поверхность капсулируемого вещества. При капсулировании жидких веществ методом поликонденсации один из мономеров растворяют в фазе капсулируемого вещества. Однако получаемые таким образом оболочки, в частности на основе полиамидов, обладают еще и высокой проницаемостью для молекул с низкой молекулярной массой, для которых период установления равновесия с окружающей жидкостью составляет несколько секунд. Такой метод находит широкое применение для микрокапсулирования высокомолекулярных соединений, например ферментных систем, белков, а также различного рода микроорганизмов.

При микрокапсулировании в псевдооживленном слое жидкий материал оболочки (раствор или расплав) напыляют на твердые частицы капсулируемого вещества, которые образуют псевдооживленный слой в потоке газа-носителя.

При продавливании частиц капсулируемого вещества через пленку пленкообразующего вещества (экструзия) происходит обволакивание частиц оболочкой. Микрокапсулирование таким способом осуществляют с помощью специальных устройств для дискретной подачи капсулируемого вещества и формирования пленки обволакивающего материала [4].

Метод физической конденсации паров основан на напылении испаренного в вакууме материала на капсулируемое вещество. Пары материала конденсируются на холодной поверхности порошкообразного субстрата и образуют твердые капсулированные частицы.

Важной характеристикой методов микрокапсулирования является размер получаемых микрокапсул. По этому признаку наиболее отчетливо разделяются методы, в которых пленкообразующий материал оболочек в процессе образования микрокапсул представляет собой расплав, и методы, основанные на разделении фаз в жидких (газообразных) средах. Первая группа методов обеспечивает получение капсул средних и больших (до нескольких миллиметров), вторая – микрокапсул размером от нескольких до сотен микрон. Наиболее мелкие микрокапсулы могут быть получены методами коацервации (от 1 мкм до 1 мм); электростатической коагуляции (от долей мкм до 20 мкм), полимеризации в эмульсиях и суспензиях (от 1 мкм до нескольких мм) или высушивания при распылении дисперсионной (эмульсионной) системы (до 500 мкм). Капсулы больших размеров (от 100 мкм до нескольких мм) получают с использованием центрифуг, экструдированных устройств и в псевдооживленном слое. Необходимо отметить, что последние методы обеспечивают наименьшее содержание пылевидной фракции, но при этом содержание основного вещества в микрокапсулах обычно бывает меньше, чем в продуктах, получаемых полимеризационными (поликонденсационными) или другими жидкофазными методами.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ





В многочисленных экспериментах при соответствующих повторях было выполнено определение гелеобразующей способности геля ламинарии (ГЛ) и альгината натрия (АН) в разных соотношениях. Результаты определения представлены в табл. 1.

Таблица 1




Определение гелеобразующей способности  
ГЛ и АН в разных соотношениях

№ п/п	Соотношение весовых частей раствора АН/ГЛ		Массовое соотношение АН / сухой остаток ГЛ, г/г	Фото процесса	Результат
	Раствор АН	ГЛ			
1	10	0	1/0		Капли раствора формируются без затруднений. Форма гранул сферическая (правильная). Гранулы прочные, упругие, сохраняют форму после деформации (раздавливания)
2	0	10	0/1		Исходный гель вязкий, обладает низкой текучестью, что препятствует формированию гранул правильной формы. Гранулы прочные, упругие, сохраняют форму после деформации (раздавливания)
3	1	9	1/72		Исходный раствор вязкий, обладает низкой текучестью, что препятствует формированию гранул правильной формы. Гранулы прочные, упругие, сохраняют форму после деформации (раздавливания)
4	2	8	1/32		Исходный раствор вязкий, обладает низкой текучестью, что препятствует формированию гранул правильной формы. Гранулы прочные, упругие, сохраняют форму после деформации (раздавливания)

Продолжение табл. 1

№ п/п	Соотношение весовых частей раствора АН/ГЛ		Массовое соотношение АН / сухой остаток ГЛ, г/г	Фото процесса	Результат
	Раствор АН	ГЛ			
5	3	7	1/18,7		
6	4	6	1/12		Исходный раствор вязкий, обладает низкой текучестью, что препятствует формированию гранул правильной формы. Гранулы прочные, упругие, сохраняют форму после деформации (раздавливания)
7	5	5	1/8		
8	6	4	1/5,3		Исходный раствор вязкий, обладает недостаточной текучестью для формирования гранул правильной формы. Гранулы прочные, упругие, сохраняют форму после деформации (раздавливания)

Окончание табл. 1

№ п/п	Соотношение весовых частей раствора АН/ГЛ		Массовое соотношение АН / сухой остаток ГЛ, г/г	Фото процесса	Результат
	Раствор АН	ГЛ			
9	7	3	1/3,4		Исходный раствор вязкий, обладает недостаточной текучестью, хотя форма гранул близка к сферической. Гранулы прочные, упругие, сохраняют форму после деформации (раздавливания)
10	8	2	1/2		Капли раствора формируются без затруднений. Форма гранул сферическая (правильная). Гранулы прочные, упругие, сохраняют форму после деформации (раздавливания)
11	9	1	~1/1		Капли раствора формируются без затруднений. Форма гранул сферическая (правильная). Гранулы прочные, упругие, сохраняют форму после деформации (раздавливания)

В рамках данной работы было также выполнено комплексное исследование процесса растворения таблеток с разным покрытием в режимах, имитирующих условия желудка и кишечника. В табл. 2 представлены результаты визуального анализа поведения таблеток из ламинарии без покрытия в 0,1 н растворе соляной кислоты (имитация желудка).

Таблица 2

## Растворение таблетки из ламинарии без покрытия

Время, мин	Фото процесса	Результат
0		В начале опыта никаких изменений не наблюдается
10		Процесс набухания становится активнее
20		Маленькие частички начинают отделяться от таблетки
30		В среде становится все больше частичек таблетки
40		Растворение идет активнее, цвет среды начинает приобретать зеленоватый оттенок







Окончание табл. 2

Время, мин	Фото процесса	Результат
50		Таблетка растворяется гораздо лучше, чем на предыдущих этапах
60		Раствор среды становится более мутным
70		Таблетка очень активно растворяется в среде
80		Наблюдается практически полное растворение таблетки
90		В конце опыта таблетка полностью растворилась в среде, цвет насыщенно-зеленый

В табл. 3 представлены результаты визуального анализа поведения таблеток из ламинарии с покрытием из ГЛ и АН в соотношении 7:3 и маннита в 0,1 н растворе соляной кислоты (имитация желудка).





Таблица 3

Растворение таблетки из ламинарии с покрытием из ГЛ и АН  
в соотношении 7:3 и маннита в 0,1 н растворе соляной кислоты

Время, мин	Фото процесса	Результат
0		Начало опыта, никаких изменений не наблюдается
10		С таблеткой ничего не происходит
20		Цвет среды приобретает слегка зеленоватый оттенок
30		
40		Таблетка немного набухает
50		




Окончание табл. 3

Время, мин	Фото процесса	Результат
60		Появилось небольшое количество частичек
70		Цвет среды остается немного зеленоватым
80		
90		Конец опыта, таблетка не растворяется за счет нанесенного покрытия

В табл. 4 представлены результаты визуального анализа поведения таблеток из ламинарии с покрытием из ГЛ и АН в соотношении 7:3 и маннита в фосфатном буферном растворе с  $pH = 6,86$  (имитация кишечника).

Таблица 4


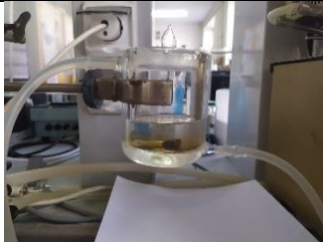

Растворение таблетки из ламинарии с покрытием из ГЛ и АН в соотношении 7:3 и маннита в фосфатном буферном растворе с  $pH = 6,86$

Время, мин	Фото процесса	Результат
0		В начале опыта никаких изменений не наблюдается

*Продолжение табл. 4*

Время, мин	Фото процесса	Результат
10		Таблетка постепенно набухает
20		Таблетка активно набухает
30		Таблетка увеличивается в размере
40		
50		Таблетка растворяется лучше, чем на предыдущих этапах
60		

Окончание табл. 4

Время, мин	Фото процесса	Результат
70		Таблетка растворяется лучше, чем на предыдущих этапах
80		
90		В конце опыта таблетка полностью набухла, при встряске наблюдается полное растворение





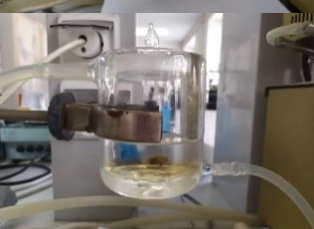

В табл. 5 представлены результаты визуального анализа поведения таблеток из ламинарии с покрытием из ГЛ и маннита в 0,1 н растворе соляной кислоты (имитация желудка).

Таблица 5

Растворение таблетки из ламинарии с покрытием из ГЛ и маннита  
в 0,1 н растворе соляной кислоты

Время, мин	Фото процесса	Результат
0		Начало опыта, никаких изменений не происходит
10		С таблеткой ничего не происходит

*Продолжение табл. 5*

Время, мин	Фото процесса	Результат
20		С таблеткой ничего не происходит
30		Цвет среды приобретает слегка зеленоватый оттенок
40		
50		Таблетка немного набухает
60		
70		




Окончание табл. 5

Время, мин	Фото процесса	Результат
80		Цвет среды остается немного зеленоватым
90		Конец опыта, таблетка не растворяется за счет нанесенного покрытия

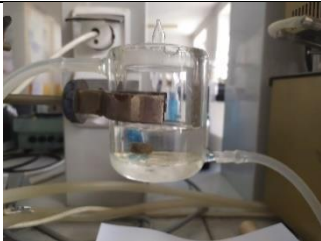
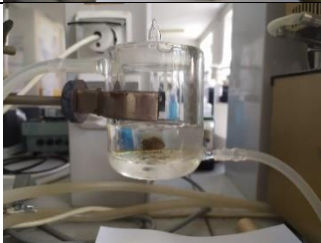

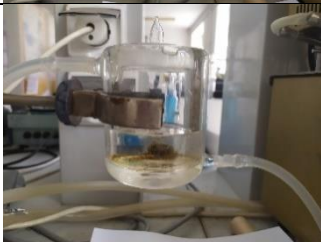


В табл. 6 представлены результаты визуального анализа поведения таблеток из ламинарии с покрытием из ГЛ и маннита в фосфатном буферном растворе с  $pH = 6,86$  (имитация кишечника).

Таблица 6

Растворение таблетки из ламинарии с покрытием из ГЛ и маннита  
в фосфатном буферном растворе с  $pH = 6,86$

Время, мин	Фото процесса	Результат
0		В начале опыта никаких изменений не наблюдается
10		Таблетка начинает набухать
20		

*Продолжение табл. 6*

Время, мин	Фото процесса	Результат
30		Набухание происходит активнее
40		
50		Растворение идет активнее, цвет среды начинает приобретать зеленоватый оттенок
60		Таблетка активно растворяется в среде, раствор становится более мутным
70		
80		

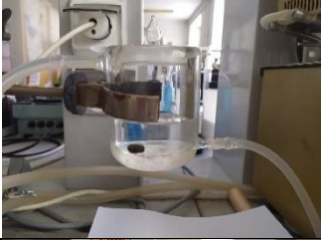

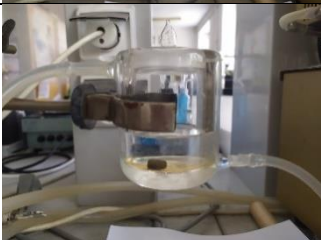

*Окончание табл. 6*

Время, мин	Фото процесса	Результат
90		В конце опыта таблетка практически полностью растворилась в среде, цвет среды зеленый







В табл. 7 представлены результаты визуального анализа поведения таблеток из ламинарии с покрытием из ГЛ и глицерина в 0,1 н растворе соляной кислоты (имитация желудка).

*Таблица 7*

Растворение таблетки из ламинарии с покрытием из ГЛ и глицерина  
в 0,1 н растворе соляной кислоты

Время, мин	Фото процесса	Результат
0		Начало опыта, никаких изменений не наблюдается
10		С таблеткой ничего не происходит
20		Цвет среды становится светло-зеленоватого оттенка
30		

Окончание табл. 7

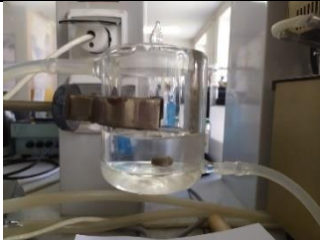





Время, мин	Фото процесса	Результат
40		Цвет среды становится светло-зеленоватого оттенка
50		Таблетка немного набухает
60		
70		Цвет среды такой же зеленоватый
80		
90		Конец опыта, таблетка не растворяется за счет нанесенного покрытия

В табл. 8 представлены результаты визуального анализа поведения таблеток из ламинии с покрытием из ГЛ и глицерина в фосфатном буферном растворе с  $pH = 6,86$  (имитация кишечника).




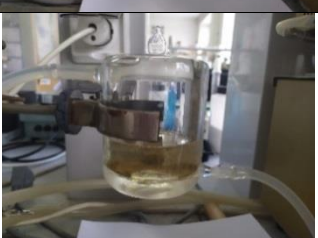


Таблица 8

Растворение таблетки из ламинарии с покрытием из ГЛ и глицерина  
в фосфатном буферном растворе с  $pH = 6,86$

Время, мин	Фото процесса	Результат
0		В начале опыта ничего не происходит
10		Таблетка начинает набухать
20		
30		Таблетка набухает активнее
40		
50		Таблетка активно растворяется, цвет среды начинает приобретать зеленоватый оттенок

Окончание табл. 8

Время, мин	Фото процесса	Результат
60		Таблетка активно растворяется, цвет среды начинает приобретать зеленоватый оттенок
70		Таблетка активнее растворяется в среде, раствор становится более мутным
80		
90		В конце опыта таблетка практически растворилась в среде, цвет среды зеленый


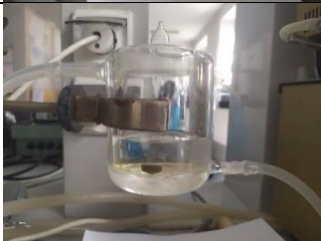
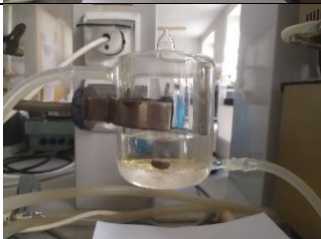



В табл. 9 представлены результаты визуального анализа поведения таблеток из ламинарии с покрытием из ГЛ и глицерина с закреплением хлоридом кальция в 0,1 н растворе соляной кислоты (имитация желудка).

Таблица 9




Растворение таблетки из ламинарии с покрытием из ГЛ и глицерина с закреплением хлоридом кальция в 0,1 н растворе соляной кислоты

Время, мин	Фото процесса	Результат
0		Начало опыта, никаких изменений не наблюдается

*Продолжение табл. 9*

Время, мин	Фото процесса	Результат
10		С таблеткой ничего не происходит, цвет среды приобретает светло-зеленоватый оттенок
20		
30		
40		Таблетка немного набухает
50		
60		

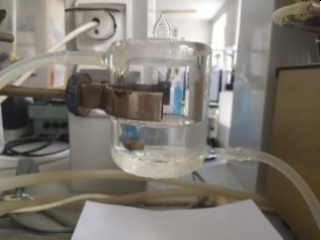

Окончание табл. 9

Время, мин	Фото процесса	Результат
70		Появилось небольшое количество частичек
80		
90		Конец опыта, таблетка не растворяется за счет нанесенного покрытия




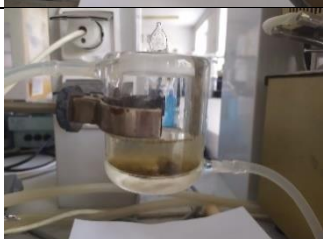
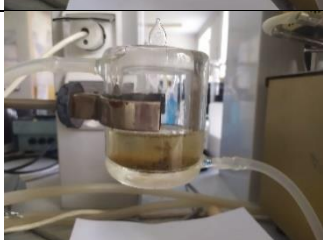

В табл. 10 представлены результаты визуального анализа поведения таблеток из ламинарии с покрытием из ГЛ и глицерина с закреплением хлоридом кальция в фосфатном буферном растворе с  $pH = 6,86$  (имитация кишечника).

Таблица 10


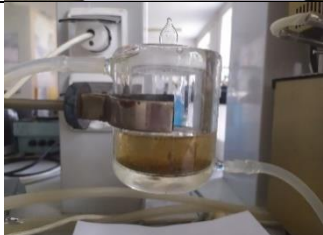
Растворение таблетки из ламинарии с покрытием из ГЛ и глицерина с закреплением хлоридом кальция в фосфатном буферном растворе с  $pH = 6,86$

Время, мин	Фото процесса	Результат
0		В начале опыта никаких изменений не наблюдается
10		Происходит набухание таблетки

*Продолжение табл. 10*

Время, мин	Фото процесса	Результат
20		Происходит набухание таблетки
30		Таблетка набухает активнее
40		
50		Таблетка очень активно растворяется, цвет среды начинает приобретать зеленоватый оттенок
60		
70		Наблюдается практически полное растворение таблетки

Окончание табл. 10

Время, мин	Фото процесса	Результат
80		Наблюдается практически полное растворение таблетки
90		В конце опыта таблетка полностью растворилась в среде, цвет насыщенно-зеленый

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Методы микрокапсулирования делятся на три основные группы. Первая включает в себя такие физико-химические методы, как коацервация, осаждение нерастворителем, образование новой фазы при изменении температуры, упаривание летучего растворителя, отверждение расплавов в жидких средах, экстракционное замещение, высушивание распылением, физическая адсорбция. Вторая представляет собой химические методы: образование новой фазы путем сшивания полимеров, поликонденсацию и полимеризацию. Третью группу составляют физические методы: напыление в псевдооживленном слое, экструзия и конденсация паров.

2. В состав микрокапсул должны входить вещества, не оказывающие негативного эффекта на микрофлору кишечника, а также на состояние слизистой желудка и кишечника, способные к биоразложению с образованием безвредных для организма метаболитов.

3. Существуют определенные требования к методам изготовления микрокапсул: в процессе инкапсулирования и в конечном продукте стабильность и биологическая активность инкапсулированных веществ должны сохраняться, размер получаемых капсул должен находиться в определенном диапазоне, качество капсул и их характеристики должны быть воспроизводимы в одинаковых условиях, конечный продукт должен иметь вид сыпучей субстанции, без склонности к агрегации и адгезии.

4. При создании микрокапсул с веществами пептидной природы в качестве инкапсулянтов важнейшим критерием качества системы является защищенность вещества от внешних разрушающих воздействий. К последним зачастую относят условия желудка (воздействие соляной кислоты, протеолитических ферментов). С этой точки зрения альгинат является одним из наиболее перспективных полимеров.

5. При массовых соотношениях АН и ГЛ 1/0, ~1/1, 1/2 капли раствора формируются без затруднений. Форма гранул сферическая (правильная). Гранулы прочные, упругие, сохраняют форму после деформации (раздавливания). В последующих соотношениях АН и ГЛ 0/1, 1/72, 1/32, 1/18,7, 1/12, 1/8, 1/5,3, 1/3,4 исходный гель вязкий, обладает низкой текучестью, что препятствует формированию гранул правильной формы. Гранулы прочные, упругие, сохраняют форму после деформации (раздавливания).

б. При исследовании процесса растворения таблеток с разным покрытием в условиях, имитирующих условия желудка, наблюдалось небольшое набухание таблетки в 0,1 н растворе соляной кислоты, цвет среды приобретал светло-зеленоватый оттенок. В целом с таблеткой ничего не происходило, так как она не растворяется за счет нанесенного покрытия. При исследовании процесса растворения таблеток с разным покрытием в условиях, имитирующих условия кишечника, наблюдалось активное набухание таблетки в фосфатном буферном растворе с  $pH = 6,86$ . Происходило активное растворение, среда приобретала зеленоватый оттенок, после 1,5 ч нахождения в фосфатном буфере таблетка полностью растворилась в среде и цвет раствора стал насыщенно-зеленым.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-08-00185).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alshady R. Microspheres. Microcapsules and Liposomes // *MML-series*. Vol. 1–2. London, 1999.
2. Ляпустин, А.В. Перспективы применения методов инкапсулирования в малотоннажной технологии получения биологических препаратов // *Биотехнология, экология, медицина: материалы III–IV Международных научных семинаров 2001–2002 гг.* / под ред. А.Ф. Труфанова. М. – Киров: ЭКСПРЕСС, 2002. С. 42–45.
3. Tarnowiecka A., Krawczynska W., Bartkowiak A. Immobilization of fish oil in alginate microcapsules as potential food additives // *Int. Workshop on Bioencapsulation*. 2006, pp. 343–346.
4. Kim D.G., Jeong Y.I., Choi C., Roh S.H., Kang S.K., Jang M.K., Nah J.W. Retinol-encapsulated low molecular water-soluble chitosan nanoparticles // *Int J. Pharm.* 2006, pp. 130–138.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

*КАРПЕНКО Ирина Игоревна* – студентка химико-технологического факультета, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: science@science.tver.ru

*МАНАЕНКОВ Олег Викторович* – канд. хим. наук, доцент кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22.

*ИЛЬИНА Ксения Олеговна* – студентка химико-технологического факультета, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22.

*МОЛЧАНОВ Владимир Петрович* – д-р техн. наук, профессор кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Карпенко И.И., Манаенков О.В., Ильина К.О., Молчанов В.П. Разработка способов получения полисахаридных капсул для лекарственных форм на основе водных экстрактов морских водорослей // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 3 (11). С. 78–105.

---

**DEVELOPMENT OF METHODS FOR OBTAINING  
POLYSACCHARIDE CAPSULES FOR DOSAGE FORMS  
BASED ON WATER EXTRACTS OF SEAWEED**

*I.I. Karpenko, O.V. Manaenkov, K.O. Il'ina, V.P. Molchanov*  
*Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** The aim of the work is to create methods for obtaining polysaccharide capsules based on aqueous extracts of seaweed for the subsequent development of dosage forms and food products of increased authenticity and biological quality that correspond to the current level of knowledge about the role of nutrition in maintaining health and meet the requirements of the consumer market. The article presents a brief analysis of the scientific and technical literature on the issues of obtaining encapsulated forms of nutrients that can be used in the creation of functional food products, considers the main methods and techniques of microcapsulation and describes the results of search experiments to determine the gel-forming ability of kelp gel and sodium alginate, as well as to study the process of dissolving tablets with different coatings in modes that simulate the conditions of the stomach and intestines.

**Keywords:** biopolymers, biologically active substances, immobilization, encapsulation, dosage forms, polysaccharide capsules, seaweed.

**REFERENCES**

1. Alshady R. Microspheres. Microcapsules and Liposomes. *MML-series*. Vol. 1–2. London, 1999.
2. Lyapustin A.V. Prospects for the application of encapsulation methods in low-tonnage technology for the production of biological drugs. *Biotechnology, Ecology, Medicine: Materials of the III–IV International Scientific Seminars 2001–2002* / ed. A.F. Trufanov. Moscow – Kirov: EXPRESS, 2002, pp. 42–45. (In Russian).
3. Tarnowiecka A., Krawczynska W., Bartkowiak A. Immobilization of fish oil in alginate microcapsules as potential food additives. *Int. Workshop on Bioencapsulation*. 2006, pp. 343–346.
4. Kim D.G., Jeong Y.I., Choi C., Roh S.H., Kang S.K., Jang M.K., Nah J.W. Retinol-encapsulated low molecular water-soluble chitosan nanoparticles. *Int J. Pharm.* 2006, pp. 130–138.



**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*KARPENKO Irina Igorevna* – Student of the Department of Chemistry and Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: science@science.tver.ru

*MANAENKOV Oleg Viktorovich* – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

*IL'INA Ksenia Olegovna* – Student of the Faculty of Chemistry and Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia.

*MOLCHANOV Vladimir Petrovich* – doctor of technical sciences, professor of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, Afanasiy Nikitin embankment, Tver, 170026, Russia.

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Karpenko I.I., Manaenkov O.V., Il'ina K.O., Molchanov V.P. Development of methods for obtaining polysaccharide capsules for dosage forms based on water extracts of seaweed // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 3 (11), pp. 78–105.

УДК 674.093

**ПОВЕДЕНИЕ КИСЛОТНОСТИ ОСАДКОВ,  
ВЫПАВШИХ В ТВЕРИ В 1990–2020 ГГ.**

*Ф.В. Качановский*

*Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Качановский Ф.В., 2021

**Аннотация.** Выполнен статистический анализ динамики кислотности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 1990–2020 гг. Установлено, что в последние 4–5 лет наблюдавшееся ранее снижение значений водородного показателя кислотности осадков *pH* практически прекратилось. Подтверждена применимость полиномиальных моделей для анализа тренда ряда *pH*. Подтверждена несущественность изменений внутригодовой динамики кислотности осадков за последние несколько лет.

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

**DOI: 10.46573/2658-7459-2021-105-113**

Состояние природной среды существенно определяется кислотностью атмосферных осадков, поэтому ее показатель кислотности *pH* играет роль одной из важных экологических характеристик среды. Наблюдения за кислотностью атмосферных осадков, выпадающих в Твери, с 1990 г. ведет лаборатория мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии. Автор настоящей статьи, начиная с 2009 г.,

использует полученные лабораторией результаты для проведения статистического анализа показателя  $pH$  и регулярно публикует результаты анализа [1–9].

Полученные при наблюдении (срочные) значения показателя  $pH$  преобразуются в среднемесячные значения, множество которых образует временной ряд длиной 31 год (1990–2020 гг.) с постоянным шагом. Число членов (месяцев) ряда достигло 372. Члены ряда обозначаются как  $atpH_t$ , а номера членов ряда – как  $t$ . Ряд значений  $atpH_t$  подвергается статистическому анализу.

Временная последовательность среднемесячных значений показателя кислотности  $atpH$  за 1990–2020 гг. представлена на рис. 1.

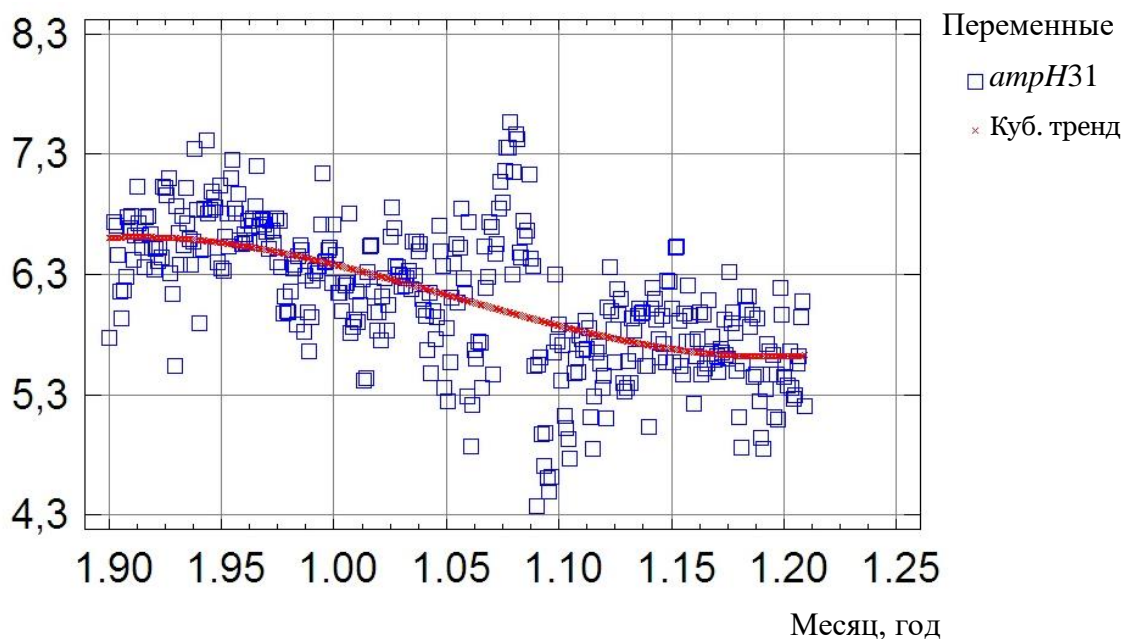


Рис. 1. Временная последовательность  $atpH_{31}$  и ее тренд

Разброс значений  $atpH$  за весь период наблюдений вписывается в диапазон 4,3–7,5 единиц. Можно заметить, что при сравнительно равномерных колебаниях значений  $atpH$  с течением времени происходит их постепенное снижение. В интервале с октября 2005 г. до февраля 2009 г. равномерные колебания  $atpH$  нарушаются вмешательством (интервенцией) некоторого фактора неизвестного происхождения. Интервенция приводит к резкому увеличению амплитуды колебаний  $atpH$ , удваивает ее по сравнению со средними амплитудами временного процесса. Продолжительность интервенции сравнительно велика – более 3 лет.

Последовательность значений  $atpH$  рассматривается при анализе как нестационарный временной ряд. Статистическая модель ряда включает четыре аддитивных компоненты: три детерминированных – циклическую, сезонную и тренд – и одну случайную [10]. В качестве моделей тренда в разные годы работы с рядами  $atpH$  в ходе их удлинения принимались полиномиальные кривые регрессии (в последние несколько лет кубические полиномы).

Тренды разной длины показывают, что в течение почти 30 лет среднемесячные значения  $atpH$  снижаются, т. е. кислотность атмосферных осадков, выпадающих в Твери,

растет. При этом скорость снижения  $ampH$  с 2002 г. начинает уменьшаться, что проявляется в возникновении точек перегиба на линиях трендов.

Срединная часть линии кубического тренда (1995–2010 гг.) сравнительно устойчива и свидетельствует о равномерном уменьшении значений  $ampH$ .

Тренды рядов длиной 29, 30 и 31 год (начинающихся с 1990 г.) описываются уравнениями:

$$tr_{29} = 6,55405 + 0,00289275 \cdot t - 0,000045411 \cdot t^2 + 0,881136 \cdot 10^{-7} \cdot t^3; \quad (1)$$

$$tr_{30} = 6,58896 + 0,00147541 \cdot t - 0,0000334987 \cdot t^2 + 0,61926 \cdot 10^{-7} \cdot t^3; \quad (2)$$

$$tr_{31} = 6,60384 + 0,00089164 \cdot t - 0,000028762 \cdot t^2 + 0,518763 \cdot 10^{-7} \cdot t^3, \quad (3)$$

где  $t$  – порядковый номер месяца в ряду.

Уравнения (1)–(3) показывают, что при удлинении ряда  $ampH$  все коэффициенты кубической модели тренда закономерно изменяются: свободный член монотонно растет, а остальные коэффициенты монотонно убывают. Тренды, описываемые уравнениями (1)–(3), показаны на рис. 2.

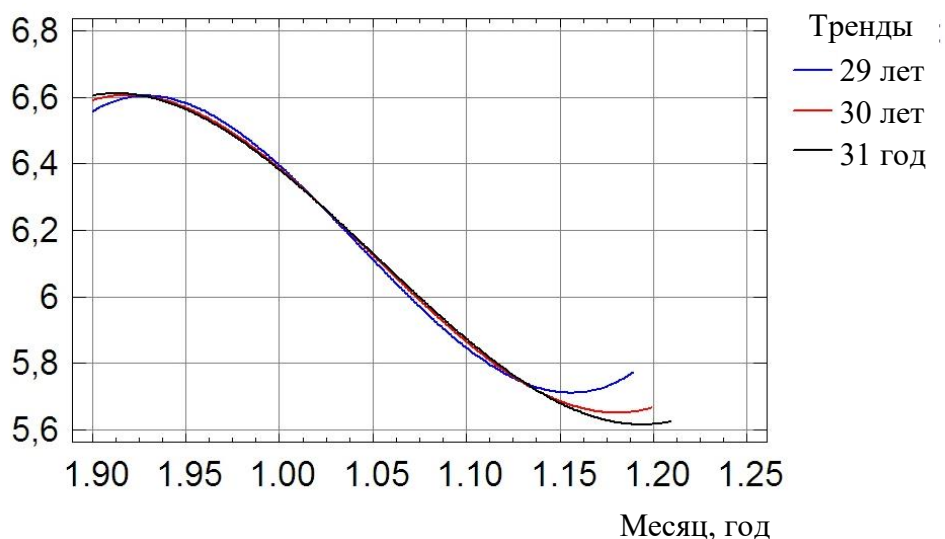


Рис. 2. Кубические тренды  $ampH$   
(1990–2018, 1990–2019, 1990–2020 гг.)

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

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

Минимум тренда 29-летнего ряда ( $ampH = 5,71166$ ) наступает при  $t = 308$  (август 2015 г.), т. е. достигается за 40 месяцев до конца ряда. Затем начинается ускоренный рост значений  $ampH$ , продолжающийся до конца расчетного периода. Заметим, что минимум модельного (кубического) тренда вовсе не означает, что реальный процесс снижения значений показателя  $ampH$  остановился. Это очевидно из дальнейшего рассмотрения трендов более длинных рядов. Так, тренд 30-летнего ряда достигает своего минимума

( $amrH = 5,65183$ ) в январе 2018 г., т. е. за 23 месяца до конца ряда. Наконец, минимум 31-летнего ряда ( $amrH = 5,61646$ ) наступает в мае 2019 г., т. е. достигается за 19 месяцев до конца ряда. Это может означать, что минимум среднемесячных значений показателя кислотности  $amrH$  в 2020 г. если еще и не достигнут, то близок.

Сезонная декомпозиция 31-летнего ряда  $amrH$  (1990–2020 гг.) позволила выделить из него случайную компоненту, а также сумму тренда и циклической компоненты. Эта сумма показана на рис. 3 вместе с кубическим трендом  $amrH31$ .

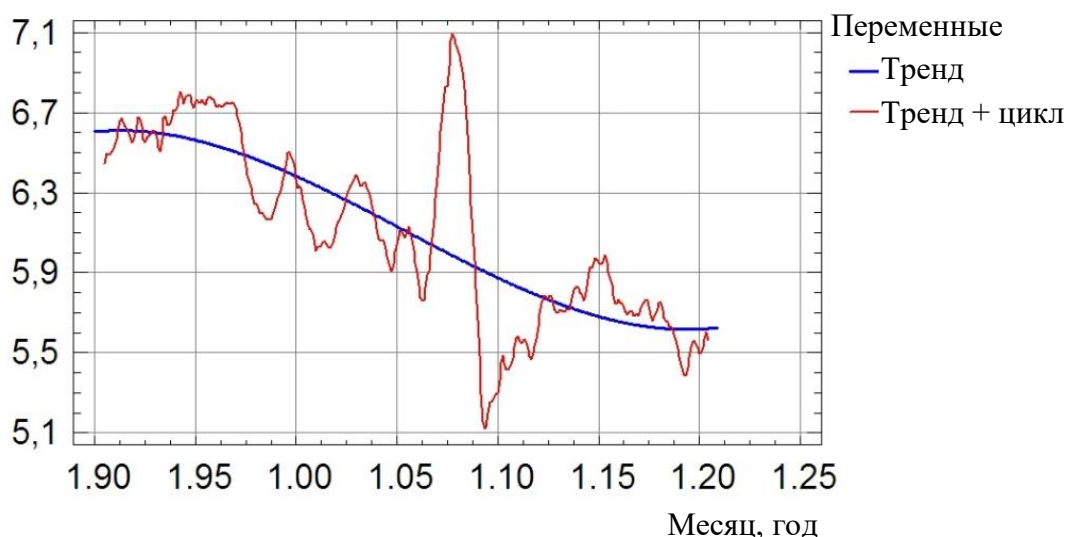


Рис. 3. Тренд + циклическая компонента ряда  $amrH$  (1990–2020 гг.) и кубический тренд  $amrH31$

Из суммы был вычтен кубический тренд и получена циклическая компонента, показанная на рис. 4 в виде отклонений от нулевых значений. При удлинении ряда наблюдений  $pH$  за 2020 г. [9] характерные черты циклической компоненты остались прежними.

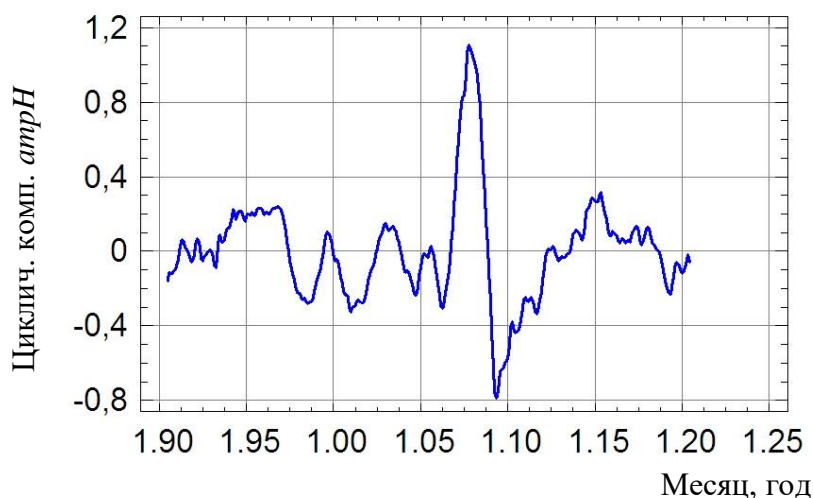


Рис. 4. Циклическая компонента ряда  $amrH31$  (1990–2020 гг.)

Видна не только интервенция 2005–2009 гг., но и так называемая мини-интервенция, приходящаяся на 2015 г. и обсужденная в [9]. Можно отнести к мини-интервенциям и распластаный в интервале от февраля 1994 г. до апреля 1998 г. отрезок ряда  $ampH_{31}$ . Отметим также, что разброс значений  $ampH$  у циклической компоненты значительно меньше, чем у исходного ряда и составляет  $\sim 1,1$  единиц по сравнению с разбросом значений  $ampH_{31}$  в диапазоне  $\sim 1,8$ . Само название этой компоненты «циклическая» представляется достаточно условным в применении к такой характеристике, как показатель кислотности  $pH$ . Она изменчива как по амплитуде колебаний, так и по протяженности циклов. Ее амплитуда (здесь не берутся во внимание параметры интервенций) изменяется в пределах 0,1–0,53, а протяженность циклов составляет от 1 года до 3 лет (см. рис. 4). Для полного определения необходимо привлечение дополнительной информации в виде других временных рядов [10].

Внутригодовую динамику показателя  $ampH$  характеризуют месячные индексы, определяемые как простое среднее  $\hat{s}_i$  отклонений значений  $ampH$  от тренда [8, 10]:

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

где  $m + 1 = 31$  – число периодов (лет) в ряду наблюдений.

На рис. 5 представлены месячные индексы трех рядов разной длины: 6 лет (короткий ряд начального периода наблюдений за показателем  $pH$ ), 27 лет и 31 год (длинные ряды последних лет наблюдений). Общий характер колебаний значений индексов у всех трех рядов схож, пики и провалы наступают синхронно, однако глобальный максимум у короткого ряда (1990–1995 гг.) наступает на три месяца раньше, чем у длинных (1990–2016 гг. и 1990–2020 гг.). У длинных рядов значения индексов мало отличаются друг от друга, что свидетельствует о стабильном состоянии (в последние 5 лет наблюдений) внутригодового процесса формирования величины  $ampH$  (и следовательно, исходного показателя кислотности  $pH$ ). Индексы короткого, шестилетнего, ряда (1990–1995 гг.) ведут себя иначе. В первом полугодии они заметно выше, а во втором, наоборот, существенно ниже, чем у длинных рядов. Это говорит о том, что условия формирования кислотности атмосферных осадков в начале 1990-х гг. были иными, чем в последние годы. Закономерен вопрос, какие причины изменения условий, формирующих кислотность атмосферных осадков, оказались более существенными – природные или антропогенные? При отсутствии конкретной информации об антропогенных факторах и их влиянии на кислотность осадков ограничимся оценкой поведения природных, т. е. климатических, факторов.

Установлено [3, 9], что одним из самых влиятельных (если не самым влиятельным) факторов является температура воздуха. Между месячными индексами 31-летних временных рядов  $ampH$  и температуры воздуха  $amt$  существует умеренно сильная положительная связь. Коэффициент корреляции связи составляет 0,552. Поэтому сравним месячные индексы температур воздуха в длинном и коротком рядах, показанные на рис. 6. Видно, что индексы этих рядов практически совпадают, т. е. за четверть века климатические условия сколько-нибудь существенно не изменились. Это означает, что причины изменений внутригодовой динамики показателя  $pH$  имеют, вероятнее всего, не климатическое, а антропогенное происхождение.

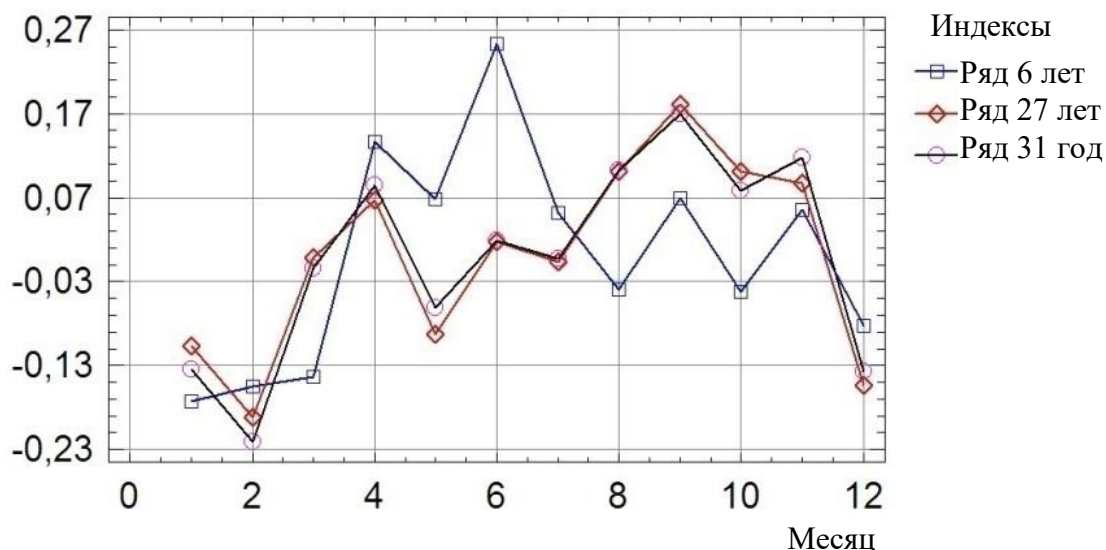
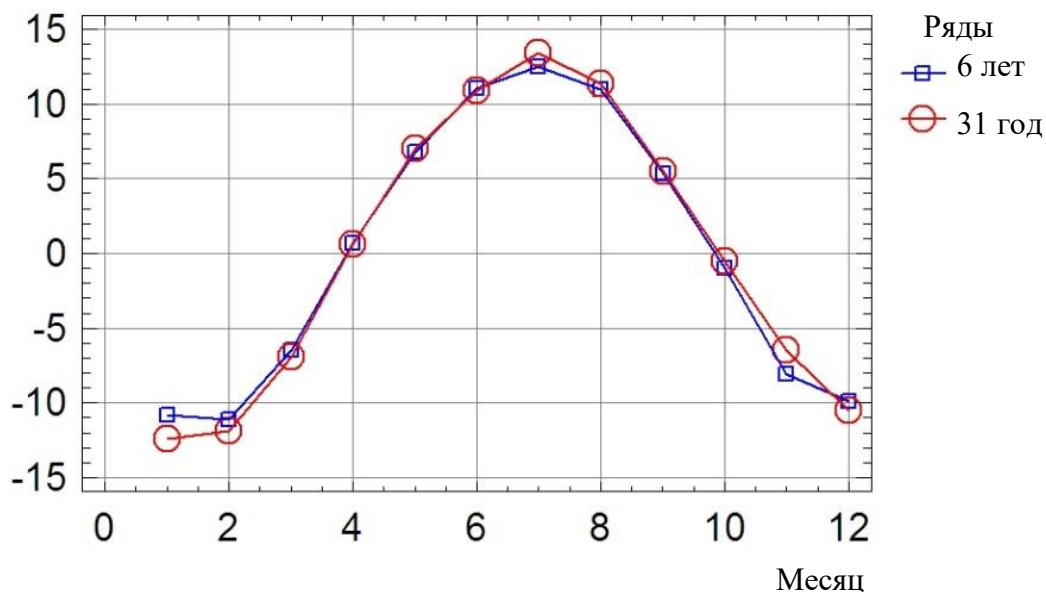
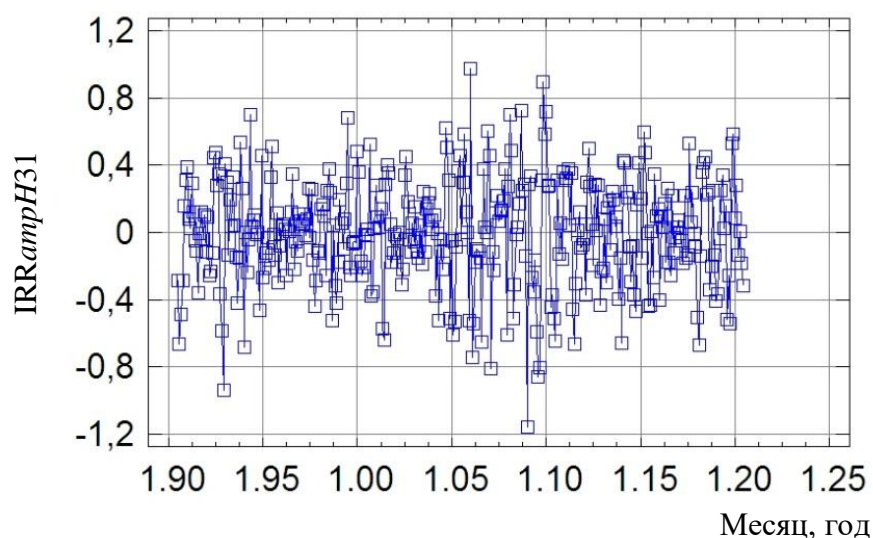
Рис. 5. Месячные индексы для рядов  $atrH$  разной длины

Рис. 6. Месячные индексы короткого (1990–1995 гг.) и длинного (1990–2020 гг.) рядов среднемесячных температур воздуха

Значения случайной компоненты ряда  $atrH$  колеблются в основном в диапазоне  $\pm 0,8$  (рис. 7). Моделью случайной компоненты 31-летнего ряда  $atrH$  служит уже неоднократно применявшийся нами ранее для более коротких рядов [1–9] комбинированный случайный процесс авторегрессии – скользящего среднего  $ARMA(p,q)$  [10], параметры  $p$  и  $q$  в котором означают порядок процессов авторегрессии и скользящего среднего.

Рис. 7. Случайная компонента ряда *амрН31* (1990–2020 гг.)

Общий вид модели:

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

где  $\varepsilon_t$  – процесс белого шума (среднее  $M\varepsilon_t = 0$ , дисперсия  $D\varepsilon_t = 0$ );  $\varphi$  – авторегрессионные коэффициенты;  $\theta$  – коэффициенты скользящего среднего.

Адекватность описания случайного остатка 31-летнего ряда *амрН* достигается (при доверительной вероятности 90 %) при  $p = 2$  и  $q = 1$ , что соответствует короткой – около двух месяцев – «памяти» у исследуемой величины. Значения параметров  $p$  и  $q$  остались такими же, как для ряда длиной 30 лет (2010–2019 гг.), т. е.  $p = 2$  и  $q = 1$ , хотя для ряда длиной 29 лет (2010–2018 гг.) они были более значительными:  $p = 3$  и  $q = 2$ .

### ВЫВОДЫ

1. Поведение 31-летнего ряда наблюдений за показателем *pH* кислотности атмосферных осадков, выпадающих в Твери, показывает, что существенное снижение среднемесячных значений показателя практически прекратилось. В течение 4–5 последних лет (2015–2020 гг.) средние значения показателя кислотности *pH* колеблются в пределах 5,6–5,8, т. е. временной ряд стабилизировался.

2. Принятая с 26-летнего ряда кубическая модель тренда оказалась пригодной и для удлинившегося – 31-летнего – ряда.

3. Характер поведения циклической и случайной компонент 31-летнего ряда *pH* остался прежним, хотя значения параметров компонент незначительно изменились.

4. Внутригодовая динамика показателя *pH* стабилизировалась, однако за период наблюдений заметно изменились значения месячных индексов показателя *амрН*.

### 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.* 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. 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, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

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.

---

### BEHAVIOUR OF THE PRECIPITATIONS ACIDITY IN TVER, 1990–2020

*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 1990–2020 years). Time series models of the indicator *pH* were examined. Cubic and quadratic models have considered as adequate. Seasonal indices of the indicator *pH* preserved his character in spite of time series lengthening.



**Keywords:** acidity, acid rain, precipitation, model, time series, trend, cycle 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: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Tver: TvGTU, 2019, pp. 59–65. (In Russian).
9. Kachanovsky F.V. On the acidity of precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Seriya «Stroitel'stvo. Elektrotehnika i himičeskie tehnologii»*. 2020. No. 2 (6), pp. 66–75. (In Russian).
10. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. Statistical analysis of data on a computer. M.: INFRA-M, 1998. 528 p. (In Russian).

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

*KACHANOVSKY Felix Vjacheslavovich* – Associate Professor of the Department of Hydraulics, Heat Engineering and Hydraulic Drive, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. Behaviour of the precipitations acidity in Tver, 1990–2020 // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 3 (11), pp. 105–113.

ВЕСТНИК  
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал  
№ 3 (11), 2021

Редактор Я.А. Петрова  
Корректор Ю.А. Якушева

---

Подписано в печать 02.12.2021

Формат 60x84 1/8

Физ. п. л. 14,25

Тираж 500 экз.

Усл. п. л. 13,25

Заказ № 223

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 12,398

С – 114

---

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

Отпечатано в ООО «Наукоемкие технологии»

Центр инженерной печати  
170024, г. Тверь, ул. Академическая, д. 14