

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

№ 2 (10), 2021

Тверь 2021

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2021. № 2 (10). 110 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: Эл № ФС77-74949 (онлайн) от 25 января 2019 г.

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

ISSN 2686-794X (онлайн)

**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 2686-794X

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.

**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 2686-794X

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.-ingeneer;

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

СОДЕРЖАНИЕ**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

<i>Белов В.В., Баркая Т.Р., Куляев П.В.</i> Неавтоклавный поризованный бетон на основе топливной золы	6
<i>Перевозчикова С.В., Белов В.В.</i> Использование микросфер для улучшения свойств сухих строительных смесей	19
<i>Федоров В.В., Федоров М.В.</i> Архитектурно-ландшафтная среда исторических поселений: от семантики к прагматике	30
<i>Черемных С.В.</i> Решение задачи устойчивости цилиндрической оболочки из стали для пропорциональных процессов нагружения в программе для ЭВМ.....	37

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Качановский Ф.В.</i> Анализ особенностей электропроводности осадков, выпавших в Твери в 2016–2020 гг.....	47
<i>Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Осей-Овусу Р.</i> Управление рисками и надежностью в системах электроснабжения.....	56
<i>Макаров А.Н.</i> Влияние задымленности атмосферы и высоты шлака на теплообмен в дуговых сталеплавильных печах. Часть I. Влияние задымленности атмосферы на потери с газами и водой.....	67
<i>Шум Ал.А., Ветошкин А.М., Шум Ан.А.</i> Моменты плоской пластины относительно прямой и некоторые вопросы симметрии	78

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков А.В.</i> Определение энергии активации синтеза магнитных смазочных наномасел на основе вискозиметрических исследований.....	85
<i>Виноградова М.Г.</i> УФ-спектральный анализ растительного сырья ландыша майского.....	95
<i>Лебедев В.В., Марилов Н.Г.</i> Снижение вредного воздействия при порошковой покраске.....	103

CONTENTS**CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE**

<i>Belov V.V., Barkaya T.R., Kulyaev P.V.</i> Non-autoclave porous concrete based on fuel ash	6
<i>Perevozchikova S.V., Belov V.V.</i> Dry mix for restoration and restoration of buildings based on white cement and hollow glass microspheres	19
<i>Fedorov V.V., Fedorov M.V.</i> Architectural and landscape environment of historical settlements: from semantics to pragmatics	30
<i>Cheremnykh S.V.</i> Solution of the problem of stability of a cylindrical shell made of steel for proportional loading processes in a computer program	37

ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Kachanovsky F.V.</i> Analysis of the electrical conductivity of the precipitation in Tver during 2016–2020 years.....	47
<i>Korneev K.B., Sokolova Yu.M., Osei-Ovusu R.</i> Risk and reliability management in power supply systems	56
<i>Makarov A.N.</i> Influence of atmospheric smoking and slag height on heat exchange in arc steel melting furnaces. Part I. Influence of atmospheric humidity on losses with gases and water.....	67
<i>Shum Al.A., Vetoshkin A.M., Shum An.A.</i> Moments of a flat plate relative to a straight line and some questions of symmetry	78

CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov A.V.</i> Determination of the energy of activation of the synthesis of magnetic lubricant nanooils based on viscosimetric studies.....	85
<i>Vinogradova M.G.</i> UV-spectral analysis of plant raw materials may lily of the valley.....	95
<i>Lebedev V.V., Marilov N.G.</i> Reduced exposure to powder coating	103

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



УДК 666.973

НЕАВТОКЛАВНЫЙ ПОРИЗОВАННЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ ТОПЛИВНОЙ ЗОЛЫ

*В.В. Белов, Т.Р. Баркая, П.В. Куляев**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*© Белов В.В., Баркая Т.Р.,
Куляев П.В., 2021

Аннотация. В работе рассмотрена малоэнергоёмкая технология неавтоклавно поризованного бетона (НЗПБ) на основе топливной золы. После затворения водой и перемешивания в обычном смесителе сырьевая смесь заливается в формы или опалубку, где вспучивается и затем твердеет в нормальных условиях или с небольшой тепловой обработкой. Указано, что использование НЗПБ с такой же средней плотностью, как у обычных легких бетонов на обжиговых заполнителях, для армированных несущих конструкций может быть оправдано близкими значениями общей пористости и связанными с ними показателями упругих и деформативных свойств, а также аналогичными условиями работы арматуры в этих изделиях. Сделан вывод, что НЗПБ, по сравнению с газозолотонами, выгодно отличаются большей стабильностью свойств при изготовлении, меньшим расходом газообразующих добавок, а по сравнению с обычными легкими бетонами – отсутствием дорогостоящих крупных пористых заполнителей. Определены прочностные и деформативные характеристики НЗПБ как при кратковременных, так и при действующих длительно нагрузках, что является базой для дальнейших исследований применения этого перспективного материала в несущих и ограждающих конструкциях.

Ключевые слова: неавтоклавный газобетон, топливная зола в качестве наполнителя, малоэнергоёмкая технология, прочностные характеристики, деформативные характеристики.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-6-18

Целесообразность применения в несущих конструкциях легкого бетона вместо тяжелого обусловлена снижением нагрузки от собственной массы конструкций, что обеспечивает экономию арматуры и самого бетона. Для крупных инженерных сооружений и многоэтажных зданий переход от тяжелого бетона к конструкционному легкому позволяет уменьшить затраты на возведение фундаментов [1]. При этом снижение плотности бетона для несущих и ограждающих конструкций дает дополнительную теплозащиту внутренних помещений, облегчает условия эксплуатации самих конструкций, что предопределяет актуальность разработки таких материалов [2].

Снизить стоимость легкобетонных конструкций можно, отказавшись от применения дорогостоящих пористых заполнителей и использования при изготовлении таких конструкций эффекта поризации бетонной смеси с получением структуры бетона, характеризующейся наличием большого количества мелких замкнутых пор, что предопределяет высокую водонепроницаемость и морозостойкость. Способы поризации бетонной смеси на основе воздухововлекающих добавок типа СНВ и пенообразователей при их сравнительно небольшом расходе не позволяют существенно уменьшить плотность и материалоемкость конструкций, а при большом количестве добавок дороги (из-за высокой стоимости и дефицитности самих добавок). Кроме того, эти способы отличаются сложностью изготовления бетона.

В настоящее время из-за увеличения стоимости энергоресурсов стали рассматривать в качестве строительных материалов минеральные материалы с высокими теплоизоляционными свойствами. К ним относится неавтоклавный газобетон [3, 4]. Большой интерес вызывает получение ячеистого бетона неавтоклавного твердения, обладающего малой энергоемкостью, безотходностью и экологической чистотой [5]. Однако усадка неавтоклавного газобетона в процессе высыхания может достигать 2–3,5 мм/м. На нее значительно влияют свойства межпоровой перегородки [6], которые во многом определяются микроструктурой, оптимизируемой с помощью тонкодисперсных минеральных добавок, что в итоге оказывает положительное комплексное воздействие на технологию и свойства теплоизоляционных материалов [7]. Например, добавка фосфогипса в составе неавтоклавного ячеистого бетона играет роль не только наполнителя, но и активатора [8]. При этом установлено уменьшение усадки данного материала с увеличением содержания минеральных добавок вместо части цемента [9].

Армирование высокодисперсными базальтовыми волокнами позволяет компенсировать главные недостатки обычного бетона – низкую прочность при растяжении и хрупкость (недостаточную трещиностойкость) [10], а также, что очевидно, снизить усадку. В работе [11] исследованы и проанализированы следующие методы снижения усадки бетона: использование цемента с пониженным тепловыделением, стальных волокон; применение полипропиленовых волокон с предварительным их увлажнением, легкого заполнителя, предварительно насыщаемого водой. Интересно, что в случае с природным легким заполнителем с размером зерен 2–4 мм, предварительно насыщаемым водой, усадка высокопрочного бетона в возрасте 28 сут сократилась примерно на 48 % по сравнению с эталонным бетоном и не изменялась прочность при сжатии [11].

Развитие прочности пластифицированного цементного камня, изготовленного с дозировкой суперпластификатора С-3 в интервале от 1,0 до 0,25 % от массы цемента при постоянном значении В/Ц, свидетельствует о том, что прочность пластифицированного цементного камня может быть как выше, так и ниже, чем у контрольного состава [12]. Существует технология, не допускающая усадочных деформаций при получении газобетонных стеновых камней на основе отходов дробления бетона по литьевым технологиям средней плотностью 650–750 кг/м³ с оптимальной структурой [13]. В процессе высыхания газобетона неавтоклавного твердения усадка может достигать величины 2,0–3,5 мм/м [14]. Дальнейшее удешевление таких конструкций возможно за счет использования в составе бетона отходов местной промышленности и прежде всего зол ТЭС. Газозобетоны по эксплуатационным показателям не уступают кирпичу и керамзитобетону, а в некоторых случаях по морозостойкости и теплозащите превосходят

их. Себестоимость производства газозолобетонных изделий (по сравнению с легкобетонными) на 50 % ниже. В условиях повышения цен на энергоносители эффективность газозолобетона будет возрастать по сравнению с бетоном на заполнителях, требующих высокотемпературной обработки [15]. Имеется определенный опыт получения армированных конструкций на основе газозолобетона [16].

Однако использованию неавтоклавных ячеистых бетонов плотностью 900–1200 кг/м³ вместо шлако- и керамзитобетона плотностью 1600–1800 кг/м³ препятствует недостаточность нормативной базы. До настоящего времени отсутствуют показатели длительной деформативности, данные о динамике прочностных и теплофизических показателей, сведения о поведении в изделиях из этих бетонов стальной арматуры и др. Во многих случаях это делает невозможным применение неавтоклавных ячеистых бетонов вместо бетонов на обжиговых заполнителях и в целом резко ограничивает область использования первых для несущих железобетонных конструкций [13]. Выход из этого положения видится в получении нового материала – неавтоклавного зольного поризованного бетона (НЗПБ) плотностью 1600–1700 кг/м³ на основе газобетонной технологии, но с меньшим количеством газообразующих добавок. Использование НЗПБ такой же средней плотности, как у обычных легких бетонов на обжиговых заполнителях для армированных несущих конструкций, может быть оправдано близкими значениями общей пористости и связанными с ними показателями упругих и деформативных свойств, а также аналогичными условиями работы арматуры в этих изделиях. В то же время НЗПБ, по сравнению с газозолобетонами, будут выгодно отличаться большей стабильностью свойств при изготовлении, меньшим расходом газообразующих добавок, а по сравнению с обычными легкими бетонами – отсутствием дорогостоящих крупных пористых заполнителей.

При получении НЗПБ в качестве кремнеземистого компонента использовался отход местной промышленности – зола гидроудаления Тверской ТЭЦ-4. Насыпная плотность золы ТЭЦ-4 колеблется от 700 до 1300 кг/м³, удельная поверхность – от 800 до 1200 см²/г. Истинная плотность зерен составляет от 2,02 до 2,5 г/см³. Зола ТЭЦ-4, согласно классификации, относится к мелкозернистой. По содержанию СаО и MgO, а также SO₃ зола отвечает требованиям стандартов. Вследствие несоответствия золы ТЭЦ-4 нормативным требованиям по удельной поверхности потребовались специальные меры для ее подготовки с целью применения в качестве зольного заполнителя при изготовлении ячеистого бетона. Другим кремнеземистым компонентом являлся песок для строительных работ по ГОСТ 8735.

В качестве щелочной добавки использовали негашеную известь с массовой долей оксида кальция в химическом составе не менее 85 %. Кроме того, во все замесы для увеличения пластичности смеси при литьевом способе формования в воду затворения вводилась добавка суперпластификатора СП-1 в постоянном количестве 1,5 % от массы цемента. Воду затворения перед формованием образцов подогревали до температуры 60–65 °С.

В качестве газообразователя в работе применялась алюминиевая пудра марки ПАП-2.

Для подбора оптимального состава НЗПБ был использован нелинейный трехфакторный планированный эксперимент типа В-D₁₃. Переменные факторы: массовая доля золы в смеси золы и песка ($Z / (Z + П)$), количество добавки газообразователя – алюминиевой пудры по отношению к массе цемента А и водоцементное отношение В/Ц, – варьировались в пределах: $Z / (Z + П) = 0–0,6$; $A = 0,07–0,11 \%$; $В/Ц = 0,57–0,69$. Отношение массы цемента к массе заполнителей (золы и песка) было постоянным и равным 1:2,3.

Приготовление бетонной смеси осуществлялось следующим образом: в сосуд для перемешивания загружали цемент, предварительно высушенные и просеянные через сито (с размером ячейки 5 мм) золу и песок, воду затворения. Смесь перемешивали с помощью пропеллерной мешалки при 150–200 об/мин в течение 2 мин. Затем определяли плотность непоризованной бетонной смеси, используя мерный сосуд емкостью 1 дм³, и текучесть смеси по величине (диаметру) расплыва лепешки с помощью вискозиметра Суттарда. После этого смесь вновь выгружали в сосуд для перемешивания, добавляли расчетное количество алюминиевой суспензии и перемешивали еще 1 мин, а потом заливали в формы кубов с ребром 10 см примерно на 90 % их высоты.

Через 2 ч после заливки смеси в формы (поризация смеси обычно заканчивалась через 30–40 мин) образцы помещали в пропарочную камеру. После твердения образцов в пропарочной камере в течение 8 ч при температуре изотермической выдержки 85 °С производили их распалубку и испытания.

В качестве критериев оптимизации состава НЗПБ определяли среднюю плотность образцов в сухом состоянии, предел прочности на сжатие, коэффициент конструктивного качества ККК, рассчитываемый по формуле

$$\text{ККК} = \frac{R_{\text{сж}}}{\gamma_0},$$

где $R_{\text{сж}}$ – предел прочности на сжатие, МПа; γ_0 – относительная плотность образцов бетона (по отношению к плотности воды), безразмерная величина.

После обработки данных эксперимента были получены коэффициенты математических моделей зависимостей свойств бетонной смеси и бетона от указанных выше факторов вида

$$y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + B_{33}X_3^2 + \\ + B_{12}X_1X_2 + B_{13}X_1X_3 + B_{23}X_2X_3,$$

где $x_1 = 3,33(Z / (Z + П) - 0,3)$; $x_2 = 50(A - 0,09)$; $x_3 = 16,7(В/Ц - 0,63)$.

Коэффициенты математических моделей зависимостей приведены в табл. 1.

Построенные по математическим моделям зависимости плотности образцов НЗПБ в сухом состоянии от факторов состава материала показывают, что увеличение содержания алюминиевой пудры А, доли $Z / (Z + П)$, а также В/Ц влияют на снижение плотности образцов в сухом состоянии. В то же время зависимости предела прочности на сжатие и коэффициента конструктивного качества имеют более сложный характер и характеризуются наличием локальных экстремумов.

Таблица 1

Коэффициенты математических моделей зависимостей свойств бетонной смеси
и зольного поризованного бетона от состава

Показатель	Коэффициент									
	B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₁₁	B ₂₂	B ₃₃	B ₁₂	B ₁₃	B ₂₃
Плотность непоризованной смеси, кг/м ³	2204	-28,5	-14,9	-7,5	-58,4	22,0	-109,4	-54,2	8,1	-50,6
Диаметр расплыва по Сутгарду, см	12,9	-4,3	-0,07	1,4	2,1	-1,7	-0,05	-0,5	-2,0	0,4
Плотность образцов бетона в сухом состоянии, кг/м ³	1616	-66,1	-97,4	-70,0	22,0	-21,5	-42,5	-49,1	-61,6	-38,1
Прочность образцов бетона, МПа	9,6	0,13	-1,5	-1,5	-0,56	-1,15	-0,59	-0,46	-0,50	-0,54
Коэффициент конструктивного качества	5,91	0,26	-0,65	-0,78	-0,38	-0,71	-0,26	-0,10	-0,13	-0,30

Для определения оптимального состава НЗПБ, соответствующего наибольшим значениям $R_{сж}$ и ККК, решены задачи оптимизации этих зависимостей. Оптимальные значения переменных факторов, соответствующие максимальному коэффициенту конструктивного качества, составили: $3 / (3 + П) = 0,465$; $A = 0,084 \%$; $В/Ц = 0,57$. При этом предел прочности на сжатие НЗПБ в возрасте 28 сут равен 15,2 МПа, плотность в сухом состоянии – 1600 кг/м³. По результатам исследований составов НЗПБ было принято решение о возможности использования конструкционного НЗПБ при изготовлении опытных образцов НЗПБ и армированных изделий на его основе.

Для изучения прочностных и деформативных свойств НЗПБ оптимального состава было изготовлено 40 кубиков размером 100×100×100 мм и 40 призм размером 400×100×100 мм. Образцы хранились в естественном состоянии при температуре 17–20 °С и влажности воздуха в пределах от 50 до 75 %. Для получения данных о динамике изменения кубиковой и призмной прочности НЗПБ, а также относительной деформации при испытании призм на сжатие в зависимости от времени проводились испытания кубов в возрасте 7, 14, 28, 45, 60, 90, 120, 150 и 200 сут, а испытания призм – в возрасте бетона 28, 90 и 200 сут. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 2

Прочностные и деформативные характеристики НЗПБ

Возраст бетона τ , сут	Прочность кубика $R_{сж}$, МПа	Призменная прочность R_b , МПа	Модуль упругости E , МПа
7	7,7	–	–
14	11,8	–	–
28	15,2	11,4	2×10^4
45	15,5	–	–
60	15,8	–	–
90	15,9	11,9	$2,04 \times 10^4$
120	16,1	–	–
150	16,25	–	–
200	16,4	12,1	$2,05 \times 10^4$

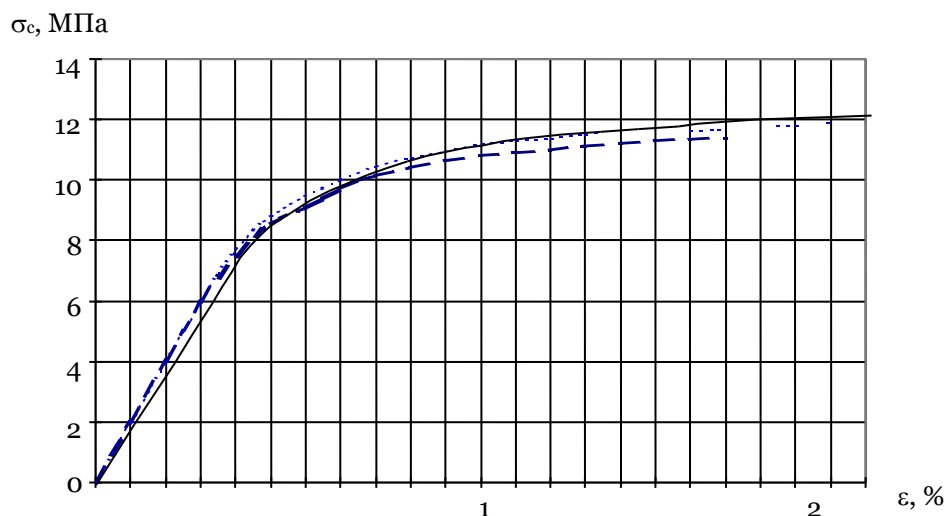


Рис. 1. Развитие относительных деформаций ε в бетоне призм при испытаниях на сжатие в различных возрастах:
 — $\tau = 28$ сут; $\tau = 120$ сут; - - - $\tau = 220$ сут

При проведении экспериментальных исследований образцов, выполненных из нового материала (т. е. НЗПБ), появилась необходимость в выявлении влияния уровня длительного нагружения на особенности процесса микротрещинообразования.

Известно, что при сжатии бетонных элементов на начальном этапе происходит некоторое уплотнение материала, обусловленное залечиванием микротрещин. При дальнейшем нагружении процесс микротрещинообразования начинает преобладать над уплотнением бетона, в результате чего структура его становится менее однородной, при этом время прохождения ультразвуковой волны увеличивается. Нагрузка, при которой приращение времени прохождения ультразвуковой волны меняет знак, соответствует первой параметрической точке R_{10} . Этот уровень нагружения определяет начало интенсивного микротрещинообразования [8]. Процесс сопровождается появлением заметных неупругих деформаций ползучести. При достижении уровня второй

параметрической точки – R_t – процессы микротрещинообразования ускоряются, а деформации ползучести бетона переходят в нелинейную область.

Испытания проводились на стандартных золотонных призмах с размерами $10 \times 10 \times 40$ см. Было испытано 6 призм.

Испытания проводились по методике из ГОСТ 17624. Для измерения времени распространения ультразвука в бетоне применялся прибор УК-10ПМС и преобразователи с резонансной частотой 60 кГц. Был использован способ сквозного прозвучивания, т. е. ультразвуковые преобразователи устанавливались с противоположных сторон образца. Для обеспечения надежного контакта между бетоном и рабочими поверхностями ультразвуковых преобразователей применялся вязкий материал – жидкое стекло. Результаты ультразвуковых исследований призм приведены в табл. 3, в которой N/N_u – уровень нагружения при сжатии в долях от разрушающей нагрузки N_u ; Δt – приращение времени прохождения ультразвуковых волн через испытываемый образец, и на рис. 2.

Таблица 3

Результаты ультразвуковых исследований призм при нагружении

Образец	Δt , мкс, в зависимости от N/N_u				
	0,2	0,4	0,6	0,8	0,95
П-1	-0,03	-0,04	-0,04	0,11	0,16
П-2	-0,025	-0,045	-0,03	0,12	0,18
П-3	-0,029	-0,038	-0,02	0,05	0,12
П-4	-0,22	-0,026	-0,017	0,03	0,12

Анализ кривых на рис. 2 показывает, что в НЗПБ изменения времени прохождения и скорости при уровнях нагружения, соответствующих появлению параметрических точек, незначительны. Эту особенность деформирования рассматриваемого материала можно объяснить его значительной пористостью.

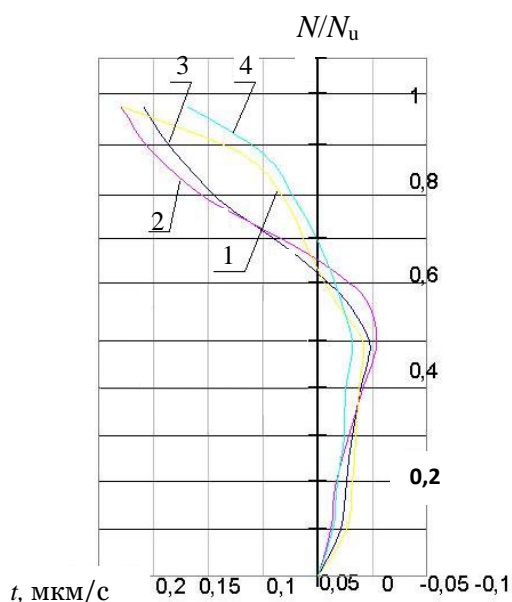


Рис. 2. Зависимость времени прохождения ультразвуковых волн от уровня нагружения: 1 – П-1; 2 – П-2; 3 – П-3; 4 – П-4

Исходя из положения критических точек, следует задавать два уровня нагружения основных образцов – 0,6 и 0,75 от разрушающего усилия. При уровне 0,6 обеспечивается такое состояние бетона, при котором деформации ползучести находятся в линейной области. Уровень нагружения 0,75 должен был обеспечить интенсивное натекание деформаций ползучести, но вместе с тем предполагалось, что нелинейность ползучести, вызванная высоким уровнем напряженного состояния, через некоторое время выдержки вследствие перераспределения напряжений сменится линейным развитием деформаций.

Были также проведены испытания, призванные выявить влияние длительного действия нагрузки. Эти испытания бетонных призм с размерами 10×10×40 см проводили в специальных пружинных установках, разработанных на кафедре конструкций и сооружений Тверского государственного технического университета. Деформации ползучести в бетонных призмах определялись по общепринятой методике путем исключения из суммарных деформаций деформаций усадки незагруженных образцов – «близнецов». Усадочные деформации замерялись на незагруженных призмах, деформации усадки и ползучести – индикаторами часового типа с ценой деления 0,002 мм, установленными с двух противоположных сторон образцов.

На протяжении всего периода испытаний измерялись деформации свободной усадки бетона, а также температура и влажность окружающей среды (рис. 3).

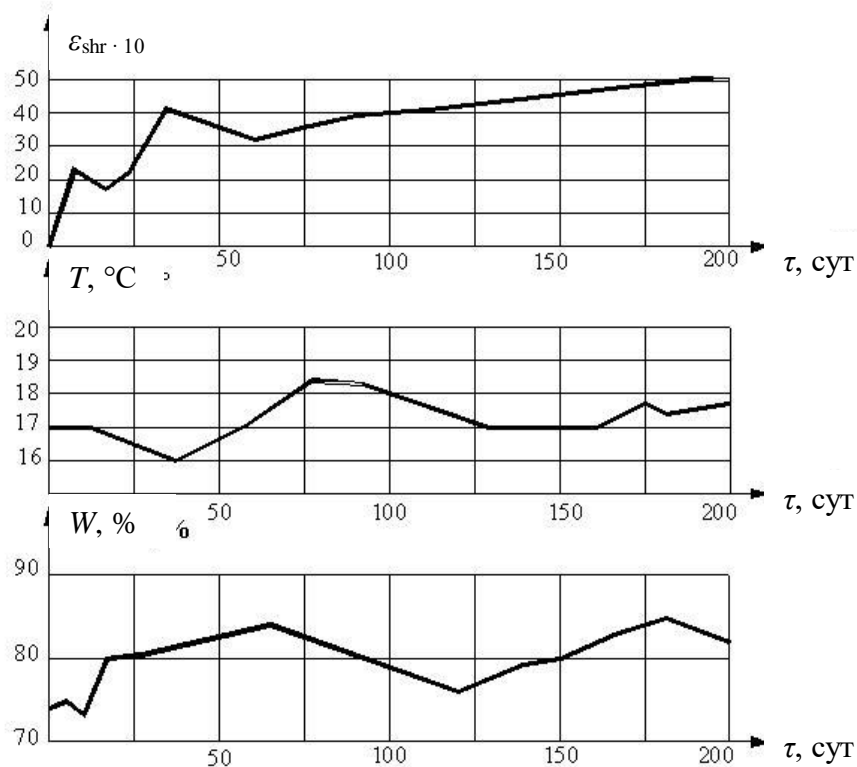


Рис. 3. Изменение во времени деформации свободной усадки бетона ε_{shr} , температуры T и относительной влажности воздуха W

Численные значения этих величин (упругие деформации ε_{be} , деформации ползучести ε_{pl} и характеристики ползучести φ_t бетона при различных возрастах

нагружения τ_1) для различных уровней и возрастов нагружений и наблюдений приведены ниже:

Возраст бетона в момент нагружения τ , сут											
55				120				200			
$t-\tau_1$, сут	$\varepsilon_{\text{ср}} \cdot 10^5$	$\varepsilon_{\text{пл}} \cdot 10^5$	φ_t	$t-\tau_1$, сут	$\varepsilon_{\text{ср}} \cdot 10^5$	$\varepsilon_{\text{пл}} \cdot 10^5$	φ_t	$t-\tau_1$, сут	$\varepsilon_{\text{ср}} \cdot 10^5$	$\varepsilon_{\text{пл}} \cdot 10^5$	φ_t
1	75,6	27	0,36	1	71,8	17,2	0,24	1	69,0	10,3	0,15
3		44	0,59	3		28,7	0,40	3		17,3	0,25
5		63	0,83	5		40,2	0,56	5		24,1	0,35
7		74	0,98	7		48,1	0,67	7		30,3	0,44
10		88	1,17	10		60,3	0,84	10		41,4	0,60
20		104	1,38	20		76,82	1,07	20		60,0	0,87
30		120	1,59	30		94,1	1,31	30		81,4	1,18
45		152	1,79	45		109,1	1,52	45		97,9	1,42
60		163	2,00	60		122,7	1,71	60		109,7	1,59
90		179	2,15	90		132,8	1,85	80		118	1,71
120		186	2,24	120		142,1	1,98				
150			2,36								
220			2,46								

Характер кривых на рис. 4 свидетельствует о явно выраженной зависимости значений φ_t от возраста бетона. Однако характер развития во времени характеристик ползучести при нагружении для возраста $\tau_1 = 50, 120, 200$ сут практически одинаков.

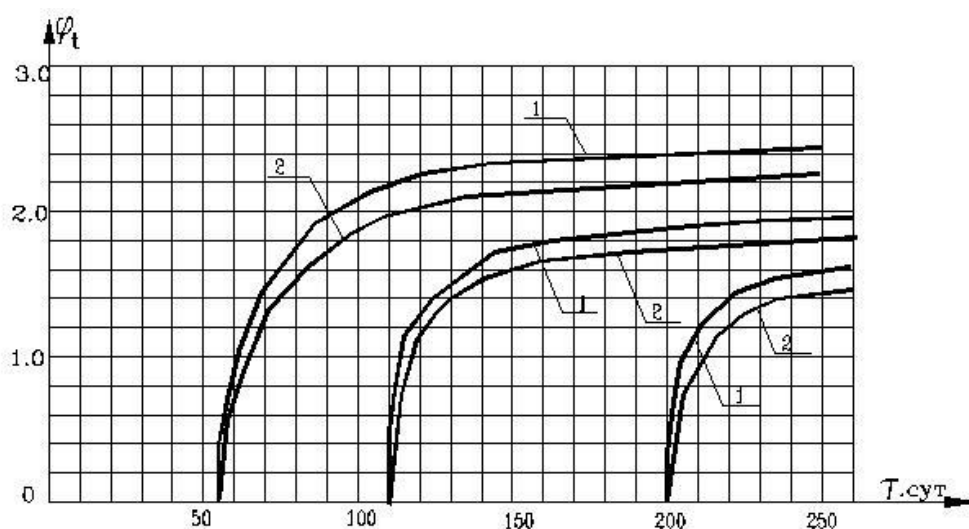


Рис. 4. Изменение во времени характеристик ползучести НЗПБ φ_t в зависимости от возраста τ и времени нагружения T :

1 — уровень нагрузки 75 % от кратковременного разрушающего усилия; 2 — то же, 60 %

Для любого времени наблюдения кривые характеристик ползучести имеют одну особенность, общую для них. Это быстрое (в течение первых суток) натекание деформаций и затем возрастание их по экспоненте с приблизительно одинаковой скоростью. Величина быстронатекающих деформаций ползучести весьма значительна и колеблется в пределах от 30 до 40 % от полных (т. е. предельных) значений для моментов времени, когда затухание становится очевидным.

Таким образом, в результате работы получен новый материал (НЗПБ плотностью 1600–1700 кг/м³) на основе газобетонной технологии, но с меньшим количеством газообразующих добавок. Установлено, что данный бетон имеет класс по прочности на сжатие В15 и призменную прочность 11,4 МПа и является достаточно эффективным конструкционным материалом.

При использовании НЗПБ масса конструкции может быть снижена на 40 % по сравнению с элементами из тяжелого бетона. Определены прочностные и деформативные характеристики НЗПБ как при кратковременных, так и при действующих длительно нагрузках, что является базой для дальнейших исследований применения этого перспективного материала в несущих и ограждающих конструкциях.

В дальнейших исследованиях предполагается: 1) усовершенствовать технологию изготовления НЗПБ, в том числе за счет использования активации зольного заполнителя с целью получения более стабильных и высоких качественных показателей материала; 2) изучить новое и нетрадиционное сочетание таких конструктивных материалов, как сравнительно малопрочный НЗПБ с плотностью 1600 кг/м³ и высокопрочная арматура; 3) исследовать деформативность, прочность и трещиностойкость сжатых армированных элементов на основе НЗПБ; 4) разработать методику определения напряженно-деформированного состояния сечений конструктивных элементов при осевом и внецентренном сжатии с учетом неупругого состояния бетона, его ползучести и усадки; 5) разработать методику расчета несущей способности конструкций на основе НЗПБ; 6) провести первичные технико-экономические расчеты по эффективности производства и эксплуатации новых несущих и ограждающих конструкций на основе НЗПБ для строительства и реконструкции зданий различного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чиненков Ю.В., Ярмаковский В.Н. Легкие бетоны и конструкции из них // *Бетон и железобетон*. 1997. № 5. С. 8–10.
2. Чернышов Е.М., Славчева Г.С., Потамошнева Н.Д., Макеев А.И. Поризованные бетоны для теплоэффективных жилых домов // *Известия вузов. Строительство*. 2002. № 5. С. 22–27.
3. Леонович С.Н., Свиридов Д.В., Шукин Г.Л. Компенсация усадки пенобетона // *Строительные материалы*. 2015. № 3. С. 3–6.
4. Свинарев А.В., Глушков А.М., Куприна А.А. Технологическая модель ТМ-25 для производства неавтоклавных фибропенобетонных изделий // *Строительные материалы*. 2014. № 6. С. 4–6.
5. Бердов Г.И., Умнова Е.В. Ячеистый шлакопортландцементный бетон на известково-серном затворителе // *Строительные материалы*. 2015. № 5. С. 76–78.

6. Логанина В.И. Свойства известковых композитов с силикатосодержащими наполнителями // *Строительные материалы*. 2012. № 3. С. 30–31.
7. Селяев В.П., Неверов В.А., Маштаев О.Г., Сидоров В.В. Микроструктура теплоизоляционных материалов на основе тонкодисперсных минеральных порошков // *Строительные материалы*. 2013. № 8. С. 79–80.
8. Yang Lin, Yan Yun, Hu Zhihua. Utilization of phosphogypsum for the preparation of non-autoclaved aerated concrete // *Construction and Building Materials*. Vol. 44. July 2013, pp. 600–606.
9. Piasta Wojciech, Sikora Hubert. Effect of airentrain menton shrinkage of blended cements concretes // *Construction and Building Materials*. № 99 (2015), pp. 298–307.
10. Сарайкина К.А., Голубев В.А., Яковлев Г.И. Наноструктурирование цементного камня при дисперсном армировании базальтовым волокном // *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 34–37.
11. Сайе Д. Способы уменьшения усадочных деформаций высокопрочного бетона // *Цемент и его применение*. 2016. № 5. С. 64–67.
12. Смирнова П.В., Моргун Л.В. Теоретическое и экспериментальное обоснование возможности управления величиной усадочных деформаций в пенобетонах неавтоклавного твердения // *Строительные материалы*. 2013. № 1. С. 96–97.
13. Ефименко А.З. Неавтоклавный газобетон на песке из отходов дробления бетона // *Строительные материалы*. 2009. № 1. С. 13.
14. Якимечко Я.Б. Неавтоклавные газобетоны с полидисперсными наполнителями на основе отходов промышленности // *Строительные материалы*. 2009. № 1. С. 24–26.
15. Силаенков Е.С. Перспективы производства и применения изделий из неавтоклавного газозолобетона на Урале // *Бетон и железобетон*. 1996. № 1. С. 2–5.
16. Яхманицкий Г.Я., Несповитая Т.П., Бекишева И.К. Пути совершенствования технологии и оборудования для производства изделий из неавтоклавного ячеистого бетона // *Бетон и железобетон*. 1997. № 2. С. 9–12.
17. Прокопович И.Е., Зедгенидзе В.А. Прикладная теория ползучести. М.: Стройиздат, 1980. 240 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

БАРКАЯ Темур Рауфович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

КУЛЯЕВ Павел Викторович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В., Баркая Т.Р., Куляев П.В. Неавтоклавный поризованный бетон на основе топливной золы // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 2 (10). С. 6–18.

**NON-AUTOCLAVE POROUS CONCRETE
BASED ON FUEL ASH**

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

Abstract. The work considers low-energy technology of non-autoclave porous concrete (NAPC) based on fuel ash. After closing with water and mixing in a conventional mixer, the feed mixture is poured into molds or formwork, where it swells and then solidifies under normal conditions or with little heat treatment. It is indicated that the use of NAPC with the same average density as conventional lightweight concrete on firing aggregates for reinforced load-bearing structures can be justified by close values of total porosity and associated elastic and deformative properties, as well as similar working conditions of reinforcement in these products. It is concluded that, in comparison with gas-reinforced concrete, NAPC favorably differ in greater stability of properties during manufacture, lower consumption of gas-forming additives, and in comparison with conventional light concrete – the absence of expensive large porous aggregates. Strength and deformation characteristics of NAPC are determined both at short-term and long-term active loads, which is the basis for further research on the use of this per-special material in bearing and enclosing structures.

Keywords: non-autoclave gas concrete, fuel ash as filler, low-energy technology, strength and deformation characteristics.

REFERENCES

1. Chinenkov Yu.V., Yarmakovskiy V.N. Light concretes and structures of them. *Beton i Zhelezobeton*. 1997. No. 5, pp. 8–10. (In Russian).
2. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S., Potamoshneva N.D., Makeev A.I. Porous concrete for heat-efficient residential buildings. *Izvestiya Vuzov. Stroitel'stvo*. 2002. No. 5, pp. 22–27. (In Russian).
3. Leonovich S.N., Sviridov D.V., Schukin G.L. Foam concrete shrinkage compensation. *Stroitel'nye Materialy*. 2015. No. 3, pp. 3–6. (In Russian).
4. Svinarev A.V., Glushkov A.M., Kuprina A.A. Technological model TM-25 for the production of non-autoclaved fibropene concrete products. *Stroitel'nye Materialy*. 2014. No. 6, pp. 4–6. (In Russian).
5. Berdov G.I., Umnova E.V. Cellular slag-portland cement be-tone on a lime-sulfur gate. *Stroitel'nye materialy*. 2015. No. 5, pp. 76–78. (In Russian).
6. Loganina V.I. Properties of lime composites with silicate-containing fillers. *Stroitel'nye Materialy*. 2012. No. 3, pp. 30–31. (In Russian).
7. Selyaev V.P., Neverov V.A., Mashtaev O.G., Sidorov V.V. Microstructure thermal insulation materials on the basis of fine mineral powders. *Stroitel'nye Materialy*. 2013. No. 8, pp. 79–80. (In Russian).

8. Yang Ling, Yang Yong, Hujihua. Utilization of phosphogypsum for the preparation of non-autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*. Vol. 44. July 2013, pp. 600–606.
9. Piasta Wocciech, Sikora Hubert. Effect of airentrain menton shrinkage of blended cements concretes. *Construction and Building Materials*. No. 99 (2015), pp. 298–307.
10. Saraikina K.A., Golubev V.A., Yakovlev G.I. Nanostructure-bath of cement stone with dispersed reinforced basalt in-locna. *Stroitel'nye Materialy*. 2015. No. 2, pp. 34–37. (In Russian).
11. Saye D. Reduction Methods Shrinkage Deformation Concrete. *Cement i Ego Primenenie*. 2016. No. 5, pp. 64–67. (In Russian).
12. Smirnova P.V., Morgun L.V. Theoretical and experimental justification of the possibility of controlling the amount of shrinkage strains in foam concrete of non-autoclave hardening. *Stroitel'nye Materialy*. 2013. No. 1, pp. 96–97. (In Russian).
13. Efimenko A.Z. Non-autoclave gas concrete on sand from concrete crushing waste. *Construction Materials*. 2009. No. 1, p. 13. (In Russian).
14. Yakimechko Y.B. Non-autoclave gas concrete with polydisperse fillers based on industrial waste. *Stroitel'nye Materialy*. 2009. No. 1, pp. 24–26. (In Russian).
15. Silaenkov E.S. Prospects for the production and use of non-nuclear gas concrete products in the Urals. *Beton i Zhelezobeton*. 1996. No. 1, pp. 2–5. (In Russian).
16. Yakhmanitsky G.Ya., Unpowered T.P., Bekisheva I.K. Ways to improve technology and equipment for the production of products from non-autoclaved cellular concrete. *Beton i Zhelezobeton*. 1997. No. 2, pp. 9–12. (In Russian).
17. Prokopovich I.E., Zedgenidze V.A. *Prikladnaya teoriya polzuchesti* [Applied theory of crawl-verse]. Moscow: Stroyizdat. 1980. 240 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

BARAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: btrs@list.ru

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V., Barkaya T.R., Kulyaev P.V. Non-autoclave porous concrete based on fuel ash // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 2 (10), pp. 6–18.

УДК 691.3

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МИКРОСФЕР ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СВОЙСТВ
СУХИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ***С.В. Перевозчикова, В.В. Белов**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*© Перевозчикова С.В.,
Белов В.В., 2021

Аннотация. В работе подчеркнута актуальность проблемы реставрации и восстановления архитектурных элементов на фасадах зданий. Отражены результаты экспериментальной работы по подбору оптимального состава смеси для облегченных архитектурных элементов, в состав которой входят полые стеклянные микросферы, белый цемент, модифицирующие добавки и доломитовая мука в качестве микронаполнителя. Представлены результаты микроскопического анализа структуры материала.

Ключевые слова: сухая строительная смесь, реставрация, полые стеклянные микросферы, облегченные конструкции.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-19-30**ВВЕДЕНИЕ**

Для развития страны и нации необходимо реставрировать как здания, имеющие культурную ценность, так и жилые здания, а также здания общего пользования. Привлекательный внешний вид городов способствует увеличению туристического потока, который вносит значительный вклад в благосостояние государства.

Ремонт и реставрация являются вторыми по значимости (после строительства новых зданий) инструментами для поддержания и улучшения внешнего облика городов России [1]. Они в значительной степени зависят не только от технологии [2, 3], но и от материалов, которые при этом используются. На современном этапе развития индустрии строительных материалов существует большое количество различных смесей и составов, применяемых для ремонтных работ. С каждым годом требования к этим материалам ужесточаются, что способствует более тщательному анализу разрабатываемых материалов и влияет на положительный конечный результат. При этом так и не решена задача получения для реставрационных работ строительных материалов с улучшенными строительными свойствами (в частности, строительных растворов с высоким уровнем физико-технических свойств и экономических показателей), которые дают возможность обеспечивать совместимость «старого» материала с «новым» [4]. Известно, что для реставрации художественной лепнины чаще всего применяют высокопрочный гипс α -модификации с высокой плотностью (до 1900 кг/м³) [5]. Полученный на его основе гипсовый камень может привести к разрушению старинных дворцов и усадеб при реставрации лепнины на потолках с деревянными перекрытиями. Авторами было предположено, что введение в гипсовую систему полых стеклянных микросфер позволит более чем в 2 раза снизить среднюю плотность гипсового камня и получить материал с

требуемой для реставрационных работ прочностью [6]. На данный момент известно, что гипсовые композиты не столь долговечны в среде, где они подвергаются действию атмосферных осадков, как композиты на основе цемента, а в нашем случае это имеет большое значение, поскольку предполагаемый композит будет использован для внешней отделки зданий и реставрации памятников архитектуры.

Продолжительность срока службы отделочных архитектурных покрытий наружных стен зданий зависит от характера воздействия различных климатических факторов, которые способны вызывать температурно-влажностные деформации внутри слоя отделки. В процессе эксплуатации ограждающих конструкций часто наблюдается частичное разрушение отделочного покрытия из-за конденсации влаги на границе «архитектурный элемент – ограждающая конструкция» [7]. Эксплуатационные свойства пористых материалов в значительной степени определяются интенсивностью происходящих в них процессов тепломассопереноса [8, 9]. От этих процессов зависят эксплуатационные свойства составов и в конечном счете изделий из данных составов.

Выше было указано, что основным недостатком облегченных цементных растворов являются низкие прочностные показатели (результат уменьшения плотности). Однако при использовании наполнителей, имеющих низкую среднюю плотность и относительно высокую прочность, а именно полых стеклянных микросфер, можно добиться значимого снижения плотности цементных растворов и обеспечить при этом их достаточную прочность. При использовании в качестве наполнителя полых стеклянных микросфер и вяжущего различной дисперсности можно получать оптимальную структуру, при которой частицы микросфер будут характеризоваться плотной упаковкой, их доля в объеме будет максимальной, а цементный камень, играющий роль связующей прослойки, будет скреплять их в прочный материал конгломератного типа строения [10].

В составах архитектурных строительных смесей используются, помимо наполнителей в виде сфер, тонкодисперсные наполнители на основе силикатов кальция. Их применяют для ускорения структурообразования в известковых композитах [11, 12]. Отделочные покрытия на основе известковых составов имеют высокие показатели паропроницаемости и биостойкости, что позволяет использовать их при реставрации и ремонте зданий и сооружений исторической застройки. Из-за того, что известковые составы характеризуются медленными сроками отверждения и обладают недостаточной водостойкостью, в их рецептуру предложено вводить нанодисперсные добавки [13]. Следовательно, разработка облегченных цементных растворов с полыми стеклянными микросферами для реставрационных работ, проводящихся в отношении архитектурных памятников, – крайне актуальная проблема.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С помощью матрицы планирования эксперимента в работе были подобраны составы растворов для оценки влияния карбонатного микронаполнителя, а также соотношения полых стеклянных микросфер и ПВА на прочность, плотность, морозостойкость и водопоглощение раствора. Количество воды принималось в соответствии с оптимальной пластичностью смеси.

Для получения комплексных характеристик материала были заформованы из данного состава образцы-кубы размерами:

100x100x100 мм (образцы данного размера необходимы для измерения теплопроводности);

70,7x70,7x70,7 мм (для измерения морозостойкости, водопоглощения, коэффициента размягчения);

20x20x20 мм (для измерения пористости, плотности, прочности на сжатие).

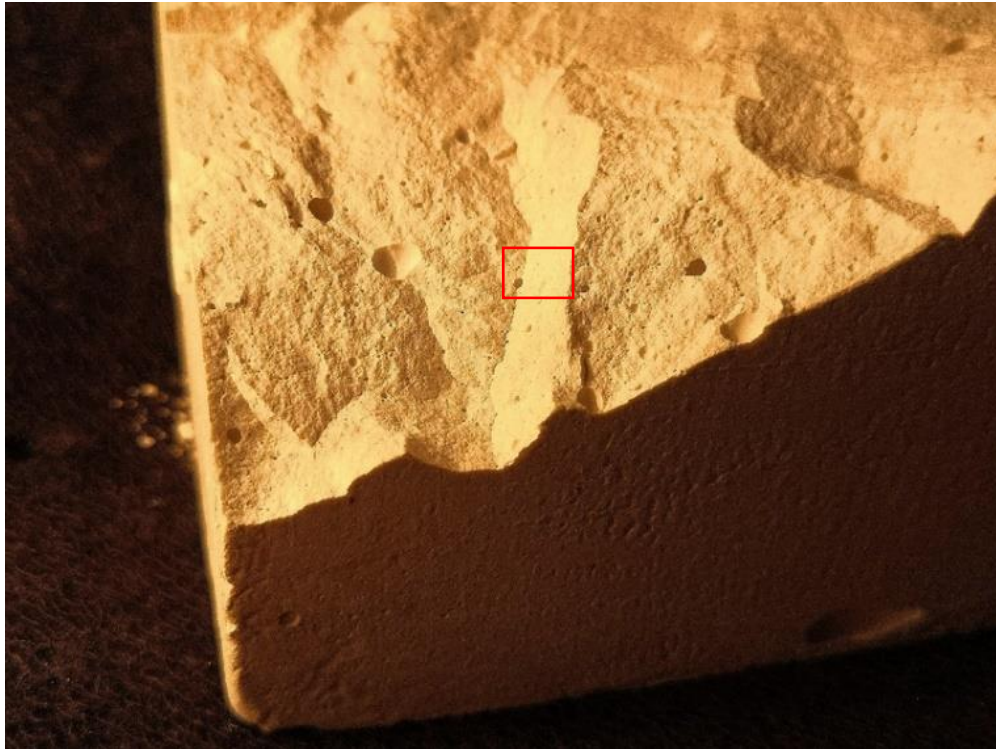
В стандартных методиках для нахождения всех характеристик требуются образцы большего размера, но для экономии дорогостоящих материалов было принято решение определять характеристики материала на образцах меньшего размера. Поскольку структура разрабатываемого материала не имеет крупного наполнителя и является мелкозернистой, замена крупных образцов более мелкими не исказила показаний, полученных при испытаниях образцов. Характеристики смеси определялись по стандартным методикам.

Данные по комплексному анализу образцов приведены в таблице.

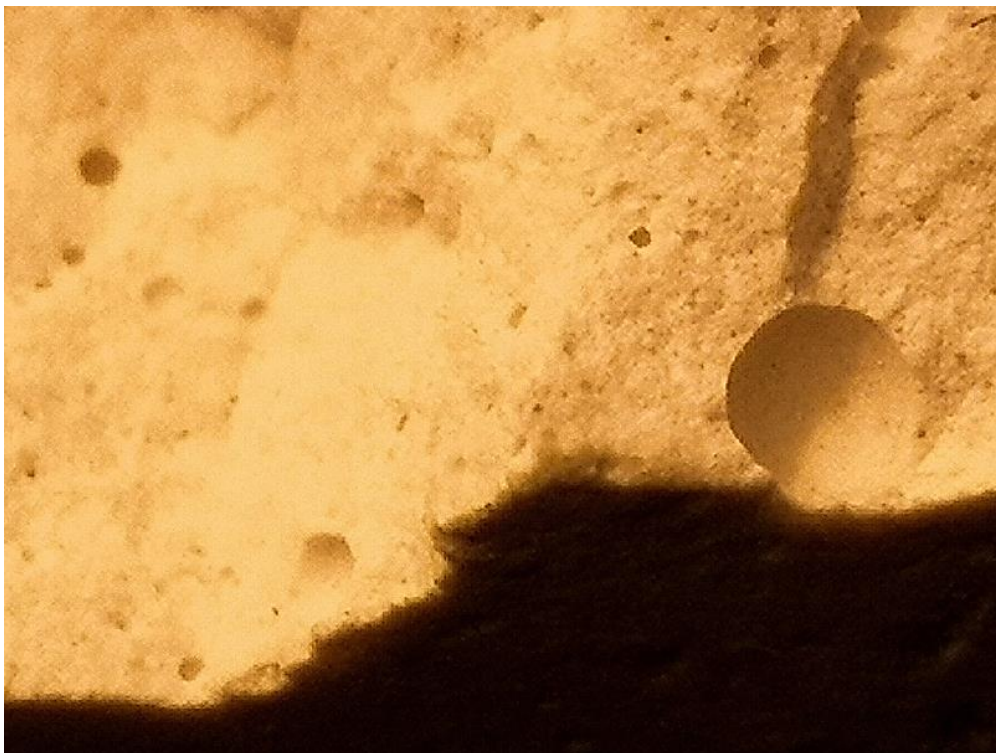
Комплексные характеристики оптимального состава сухой строительной смеси
для облегченных архитектурных элементов

Характеристика	Среднее значение серии образцов
Прочность на сжатие, МПа	16,0
Средняя плотность, г/см ³	1,4
Истинная плотность, г/см ³	1,8
Влажность, %	24,4
Водопоглощение по массе, %	20,4
Полный объем пор, %	26,3
Теплопроводность, Вт/(м·°К)	0,502
Коэффициент размягчения	0,40

Из рис. 1 видно, что материал имеет мелкозернистую структуру и включает в себя поры значительного размера. Данные поры могли возникнуть в результате недостаточного уплотнения смеси.



а



б

Рис. 1. Структура образца на изломе: а – общий вид;
б – в увеличенном изображении фрагмента

Поскольку материал предполагается использовать в среде, где он будет подвергаться действию атмосферных осадков и попеременному замораживанию и оттаиванию, данные поры могут способствовать образованию микротрещин в материале по причине расширения в них воды при отрицательных температурах, что негативно скажется на долговечности материала. Следовательно, смесь необходимо уплотнять тщательнее во избежание образования пор крупного размера.

Из рис. 1 также видно, что на поверхности материала не образуется трещин. Это свидетельствует о том, что полые микросферы предотвращают нежелательную усадку материала и тем самым не дают жидкости при действии атмосферных осадков проникать вглубь и разрушать материал.

Отсутствие трещин означает, что нет контракционной усадки. Следовательно, объем новообразований цементного камня не превышает объема исходных компонентов. Это, возможно, означает, что наполнители, используемые в составе материала, являются инертными по отношению к вяжущему веществу и не вступают с ним в химическую реакцию. Данную гипотезу можно подтвердить только с помощью микроскопического анализа. Микрофотографии структуры на изломе образца выполнены в лаборатории акционерного общества «Научно-исследовательский институт синтетического волокна с экспериментальным заводом» (АО «ВНИИСВ»), г. Тверь.

Образец материала представлял собой фрагмент, отделенный от цементного монолита путем хрупкого разрушения. Поверхность фрагмента для наблюдения в электронном сканирующем микроскопе была покрыта пленкой алюминия с помощью метода осаждения паров в вакууме. Микрофотографии получены при помощи электронного сканирующего микроскопа Hitachi S-450 на вторичных электронах. Ускоряющее напряжение составляло 10 кВ.

Ниже представлены фотографии, на которых запечатлены поверхности скола материала при постепенном увеличении (рис. 2). Хорошо видно, что стеклянные микросферы (а также следы от выпавших микросфер) хаотично распределены по материалу. Размер микросфер также сильно варьируется.

Выступающая часть поверхности микросфер практически ровная (рис. 3) и не имеет следов взаимодействия с цементом. При прохождении в материале трещины (рис. 4) микросферы отделяются от одного из ее краев, как правило, без воздействия разрушения.

Серия фотографий с постепенным увеличением края впадины, оставшейся от выпавшей микросферы, представлена на рис. 5. Хорошо видно, что во впадине отсутствуют осколки стенки микросферы, а поверхность контакта практически такая же ровная, как и поверхность микросферы, т. е. контакт микросферы с массой цемента происходит практически по всей поверхности, но без образования стойких связей.

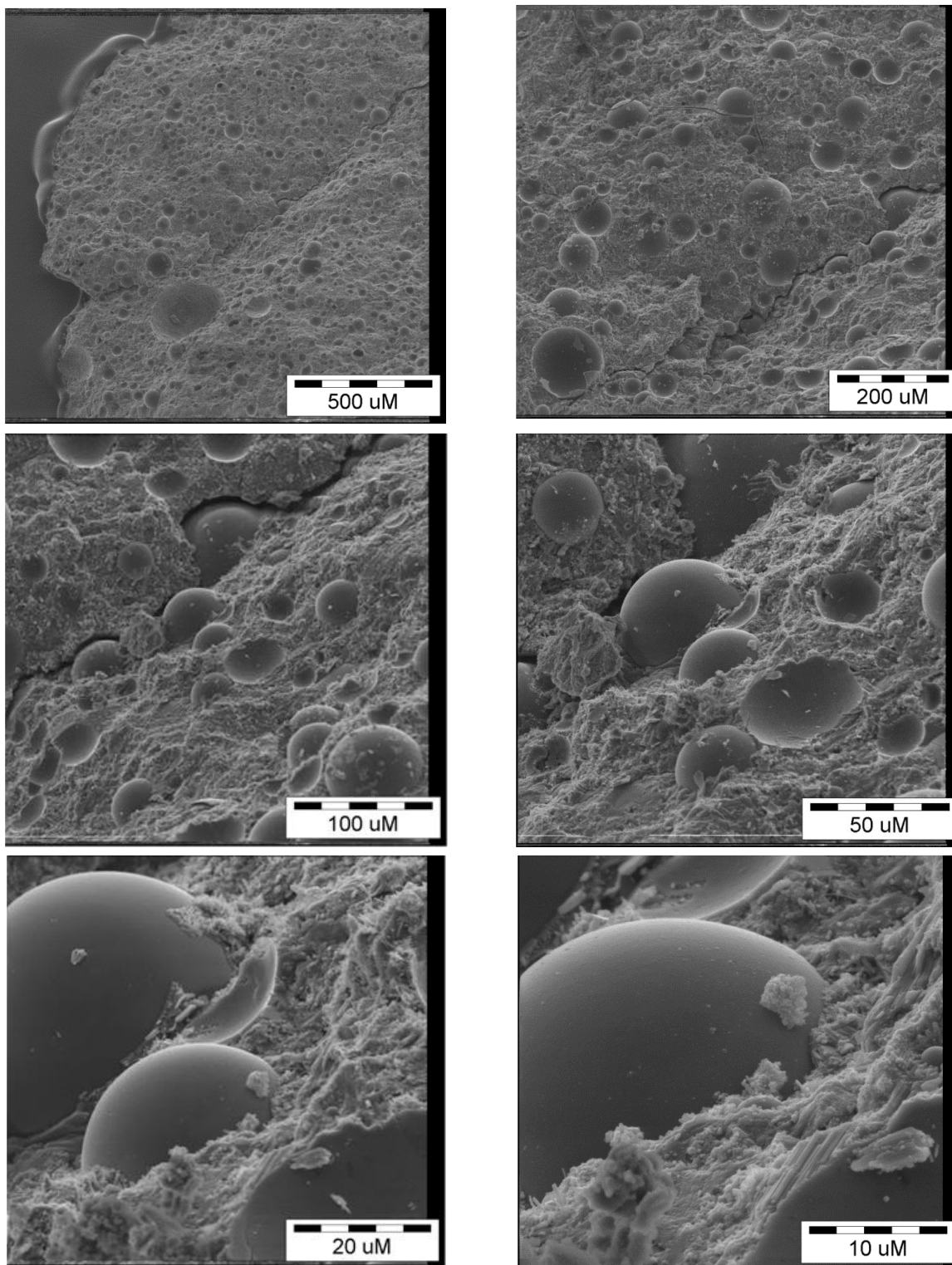


Рис. 2. Серия снимков скола поверхности исследуемого материала с постепенным увеличением

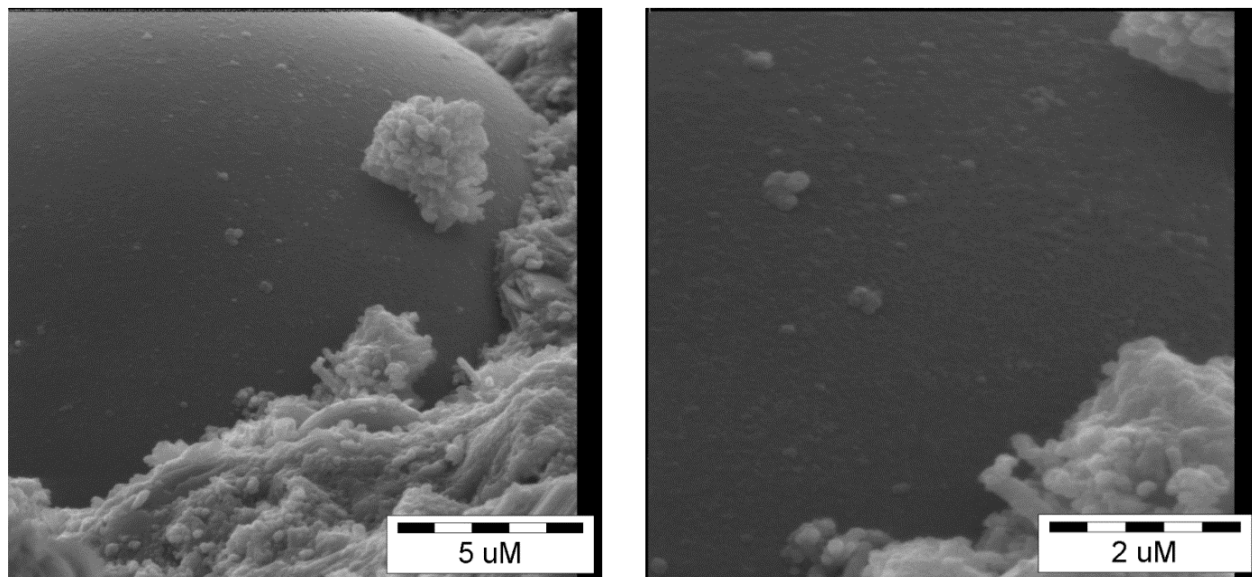


Рис. 3. Поверхность стеклянной микросферы при большом увеличении

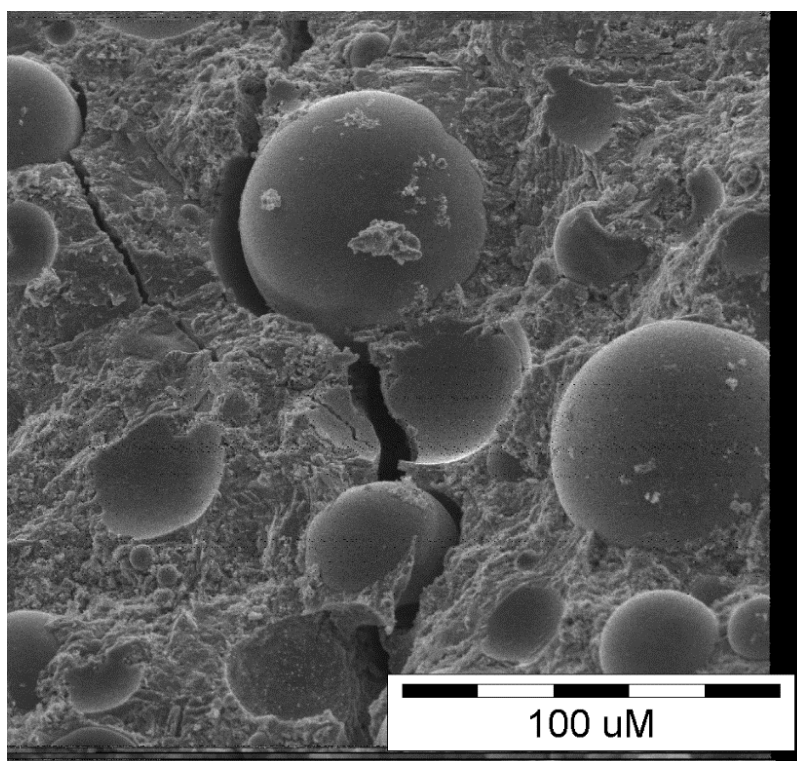


Рис. 4. Морфология материала в зоне прохождения трещины

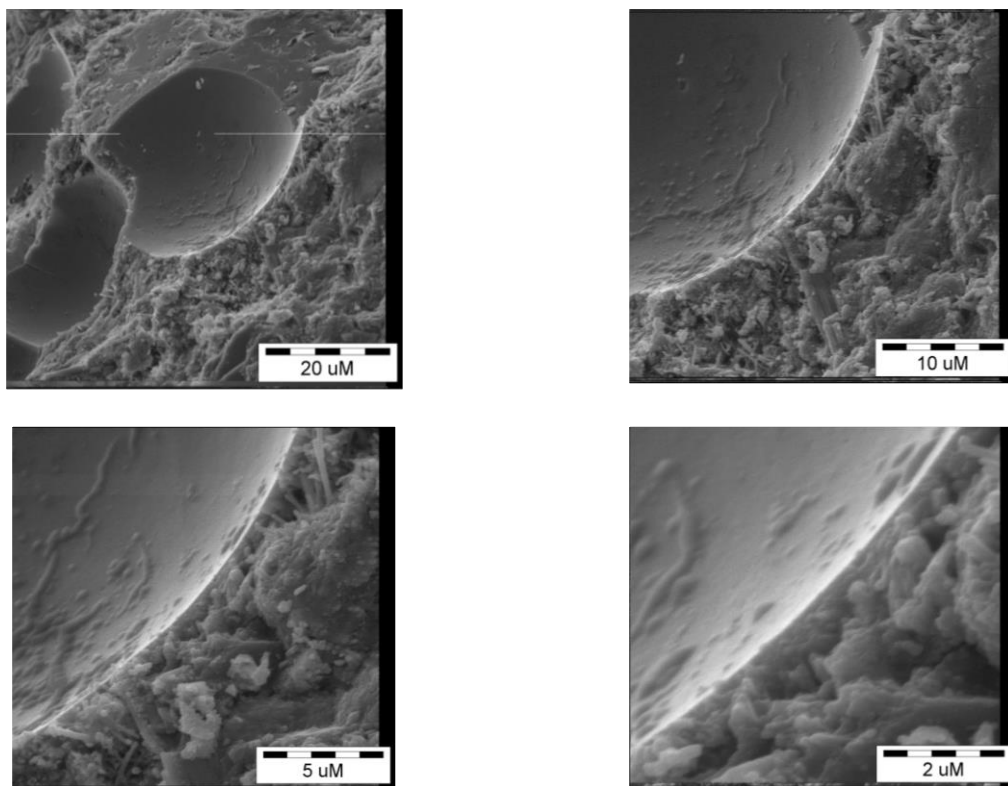


Рис. 5. Серия фотографий впадины, образовавшейся на месте выпавшей микросферы

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании полученных данных (см. таблицу) можно сделать ряд выводов о характеристиках разрабатываемого материала.

Одним из важных свойств является стойкость цементного камня в материале при переменном увлажнении и высушивании. Во время частого намокания и иссушения в структуре накапливаются остаточные деформации, из-за чего материал изнашивается. Однако в отличие от лабораторных испытаний, в которых диапазон температур и влажности достаточно высок, в реальных условиях материал не высушивается до нулевой влажности. Значения последней могут приниматься от 10 до 100 %, а значит, влага не будет удалена из материала полностью.

Средняя плотность образца достаточно низкая (1400 кг/м^3) для реставрационного состава, так как в работе [5] было описано, что для реставрации используются составы из высокопрочного гипса α -модификации, плотность которых составляет 1900 кг/м^3 . Дальнейшее снижение плотности возможно путем введения дополнительного количества полых стеклянных микросфер, однако это может отрицательно сказаться на других физико-механических свойствах композита, таких как средняя прочность и коэффициент размягчения.

Коэффициентом размягчения характеризуют водостойкость материала, связанную с водопоглощением и природой вещества заполнителя. Водопоглощение, в свою очередь, обуславливается пористостью и структурой материала, которые определяют морозостойкость заполнителя. Поскольку материал не предполагается использовать в

водной среде (коэффициент размягчения материалов, находящихся ниже уровня воды, должен быть не ниже 0,8), то показатель, равный 0,4, можно считать удовлетворительным.

Микросферы применяют для уменьшения веса готовых изделий, что приводит к сокращению трудозатрат на выполнение реконструкции, созданию стабильной поровой структуры, а также позволяет минимизировать нагрузку на деревянные конструкции исторических зданий или устаревшие части каменных изделий. Микросферы за счет своей правильной формы дают возможность использовать меньшее количество связующего для смачивания, что снижает вязкость и уменьшает усадку, так как микросферы выступают в роли «демпфирующей» добавки.

Применение в качестве добавки карбонатсодержащих пород положительно влияет на регулирование водотвердого соотношения смеси, поскольку данная добавка имеет некоторый пластифицирующий эффект, который при одновременном использовании суперпластификаторов может значительно снизить водовяжущее соотношение. Последнее приведет к повышению прочности конечного продукта и положительно скажется на формировании структуры материала. Сокращение количества воды затворения будет способствовать уменьшению количества капиллярных пор, за счет чего повысится морозостойкость материала.

ВЫВОДЫ

Использование полых стеклянных микросфер в составе облегченной коррозионно-стойкой сухой строительной смеси, применяемой для создания, ремонта и восстановления архитектурных элементов, позволит повысить трещиностойкость изделий за счет «демпфирующего» эффекта. При этом сами микросферы служат каркасом для цементной матрицы, что препятствует ее нежелательной усадке. Кроме того, наличие полых стеклянных микросфер в составе материала приводит к понижению щелочности материала, что делает его более стойким к воздействию агрессивной среды.

Разработка состава и технологии изготовления облегченной коррозионно-стойкой сухой строительной смеси плотностью 900 кг/м³ и прочностью раствора на сжатие 5,0–10,0 МПа (марки 50, 75, 100) позволит повысить качество ремонтно-восстановительных работ и долговечность архитектурных элементов и фасадов зданий, улучшить их внешний вид.

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям по программе «УМНИК-2019».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егорова О.А. Реставрация памятников архитектуры и проблема фасадализма // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 1 (60). С. 16–22.
2. Альфхар М.А., Осама Э. Проблемы реконструкции памятников архитектуры // *Интерактивная наука*. 2017. № 12. С. 153–155.
3. Крохина А.А. Проблемы реставрации памятников архитектуры в условиях современного градостроительства (правовой аспект) // *Шаг в науку*. 2019. № 3. С. 30–32.
4. Коровяков В.Ф. Гипсовые вяжущие и их применение в строительстве // *Российский химический журнал*. 2003. Т. XLVII. № 4. С. 18–25.
5. Хаев Т.Э. Реставрационные работы с применением облегченных гипсовых систем с полыми стеклянными микросферами // *Современные тенденции развития науки и технологий*. 2017. № 2-2. С. 116–118.
6. Орешкин Д.В. Облегченные и сверхлегкие цементные растворы для строительства // *Строительные материалы*. 2010. № 6. С. 34–37.

7. Лесовик В.С. Роль закона сродства структур в строительном материаловедении при выполнении реставрационных работ // *Научно-исследовательский журнал прикладных наук*. 2014. Т. 9. Вып. 12. С. 1100–1105.
8. Ватин В.И. Влияние физико-технических и геометрических характеристик штукатурных покрытий на влажностный режим однородных стен из газобетонных блоков // *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 1. С. 28–33.
9. Корниенко С.В., Ватин Н.И., Петриченко М.Р., Горшков А.С. Оценка влажностного режима многослойной стеновой конструкции в годовом цикле // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2015. № 6. С. 19–33.
10. Исаева Ю.В. Оптимизация структуры сверхлегкого цементного раствора с учетом геометрических и физико-механических характеристик компонентов // *Строительные материалы*. 2015. № 8. С. 84.
11. Фролов М.В. Структурообразование известковых композитов в присутствии модифицирующей добавки // *Современные научные исследования и инновации*. 2015. № 7. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/07/56191> (дата обращения: 10.11.2018).
12. Пышкина И.С., Жегера К.В. Эффективность применения аморфных алюмосиликатов и гидросиликатов кальция в известковых сухих строительных смесях // *Региональная архитектура и строительство*. 2017. № 4. С. 24–28.
13. Логанина В.И., Петухова Н.А., Акжигитова Э.Р. Разработка органоминеральной добавки для сухих строительных смесей // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011. № 3. С. 8–12.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕРЕВОЗЧИКОВА София Валерьевна – аспирант кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: ya.sonya1995@yandex.ru
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

Перевозчикова С.В., Белов В.В. Использование микросфер для улучшения свойств сухих строительных смесей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 2 (10). С. 19–30.

DRY MIX FOR RESTORATION AND RESTORATION OF BUILDINGS BASED ON WHITE CEMENT AND HOLLOW GLASS MICROSPHERES

S.V. Perevozchikova, V.V. Belov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The work reflects the urgency of the problem of restoration and restoration of architectural elements on the facades of buildings. Also reflected are the results of experimental work on the selection of the optimal composition of the mixture for lightweight architectural

elements, which includes white cement, hollow glass microspheres, modifying additives and dolomite flour as a microfiller. The results of microscopic analysis of the material structure are presented.

Keywords: dry mortar, restoration, hollow glass microspheres, lightweight structures.

REFERENCES

1. Egorova O.A. Restoration of architectural monuments and the problem of the facade. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov*. 2017. No. 1 (60), pp. 16–22. (In Russian).
2. Alfa M.A., Osama E. Problems of reconstruction of architectural monuments. *Interaktivnaya Nauka*. 2017. No. 12, pp. 153–155. (In Russian).
3. Krokhnina A.A. Problems of restoration of architectural monuments in the conditions of modern urban planning (legal aspect). *Shag v Nauku*. 2019. No. 3, pp. 30–32.
4. Korovyakov V.F. Gypsum binders and their application in construction. *Rossiiskij Himicheskij Zhurnal*. 2003. Vol. XLVII. No. 4, pp. 18–25. (In Russian).
5. Khaev T.E. Restoration works with the use of lightweight gypsum systems with hollow glass microspheres. *Sovremennye Tendencii Razvitiya Nauki i Tekhnologii*. 2017. No. 2-2, pp. 116–118. (In Russian).
6. Oreshkin D.V. Lightweight and ultralight cement mortars for construction. *Stroitel'nye materialy*. 2010. No. 6, pp. 34–37. (In Russian).
7. Lesovik V.S. The role of the law of affinity of structures in construction materials science when performing restoration works. *Nauchno-issledovatel'skij Zhurnal Prikladnyh Nauk*. 2014. Vol. 9. Iss. 12, pp. 1100–1105. (In Russian).
8. Vatin V.I. Influence of physical-technical and geometric characteristics of plaster coatings on the humidity regime of homogeneous walls made of aerated concrete blocks. *Inzhenerno-stroitel'nyj Zhurnal*. 2011. No. 1, pp. 28–33. (In Russian).
9. Kornienko S.V., Vatin N.I., Petrichenko M.R., Gorshkov A.S. Assessment of the humidity regime of a multilayer wall structure in an annual cycle. *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij*. 2015. No. 6, pp. 19–33. (In Russian).
10. Isayeva Yu.V. Optimization of the structure of ultralight cement mortar, taking into account the geometric and physical-mechanical characteristics of the components. *Stroitel'nye Materialy* 2015. No. 8, p. 84. (In Russian).
11. Frolov M.V. Structure formation of lime composites in the presence of a modifying additive. *Sovremennye Nauchnye Issledovaniya i Innovacii*. 2015. No. 7. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2015/07/56191> (date of access: 10.11.2018). (In Russian).
12. Pushkina I.S., Zhigera K.V. Efficiency of application of amorphous aluminosilicates and calcium hydrosilicates in lime dry building mixes. *Regional'naya Arhitektura i Stroitel'stvo*. 2017. No. 4, pp. 24–28. (In Russian).
13. Loganina V.I., Petukhova N.A., Akzhigitova E.R. Development of organomineral additives for dry building mixes. *Vestnik Belgorodskogo Gosudarstvennogo Tekhnologicheskogo Universiteta im. V.G. Shuhova*. 2011. No. 3, pp. 8–12. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

PEREVOZCHIKOVA Sofia Valerievna – Post-graduate Student of the Department of Building Materials and Structures Production, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: ya.sonya1995@yandex.ru

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

Perevozchikova S.V., Belov V.V. Dry mix for restoration and restoration of buildings based on white cement and hollow glass microspheres // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 2 (10), pp. 19–30.

УДК 712.253.011

АРХИТЕКТУРНО-ЛАНДШАФТНАЯ СРЕДА ИСТОРИЧЕСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ: ОТ СЕМАНТИКИ К ПРАГМАТИКЕ

В.В. Федоров, М.В. Федоров

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Федоров В.В., Федоров М.В., 2021

Аннотация. С точки зрения семиотики рассмотрен потенциал развития малых исторических городов в центральной части России (на примере Тверской области). Определены природно-климатические и социокультурные особенности региона. Выделена характерная черта малых исторических поселений – наличие рек и водоемов. Проанализирована роль акваторий и береговых территорий в создании комфортной городской среды. Отмечено, что переоформление контуров береговой линии и пластическая обработка прилегающих участков открывают новые возможности для создания многофункциональной и комфортной среды. Показано, что превращение акваторий и примыкающих участков в структурные элементы будущего рекреационного каркаса обеспечивает беспрепятственное перемещение горожан и туристов вдоль берегов; организацию театрализованных действий и концертов под открытым небом; композиционное разнообразие и системный характер визуального ряда участков береговой линии.

Ключевые слова: малый исторический город, акватория, береговая линия, переустройство, прибрежные территории.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-30-36

Проблема взаимоотношения культуры (воспроизводства социального бытия) и ее пространственных характеристик (предметно-пространственного наполнения городской среды) – область постоянного интереса исследователей как из области гуманитарных наук, так и из области естественных. С каждым новым поколением массовая культура заново

ментально структурирует смысловое пространство, в котором находится, а устоявшиеся представления о среде превращаются в знаковую систему.

Знаковая система города обязательно имеет две подсистемы материальных «реперов»:

- 1) архитектуру зданий и сооружений;
- 2) формы природного ландшафта.

При этом, условно говоря, в крупных городах доминирует архитектурная среда, в малых – природная. Они неотделимы от созданных культурой образов и символов, обретающих характеристики целостной системы, которую можно обоснованно рассматривать как геокультурное пространство. Национальная культура эксплицирована в архитектурно-ландшафтной среде систем расселения, состоящих из объектов разных таксономических рангов (от культурного ландшафта страны до архитектурно-ландшафтной среды небольшого поселения), которые могут быть интерпретированы и изучены как знаковые системы.

Знаки столичной и провинциальной городской среды (в контексте нашего исследования – среды архитектурно-ландшафтной) находятся в сложных, поливалентных отношениях. Создаваемые культурой системы знаков генетически связаны с базовыми установками и кодами восприятия субъекта. Архетипы и символы, на которых строится привычный образ мира, получают свое материальное воплощение в городской среде [1]. Отсюда проистекает актуальность изучения архитектурно-ландшафтной среды как знаковой системы, т. е. семантики и прагматики городского культурного ландшафта.

Семантика исследует отношения между знаками и обозначаемыми объектами, *прагматика* – отношения в системе «знак – человек» [2]. Если говорить об архитектурно-ландшафтной среде, то речь здесь пойдет о практичности, полезности, удобстве, экономической целесообразности зданий, сооружений, застройки, инфраструктуры и прочих свойствах как критериях функционирования. Семантический подход соединяет чувственное с разумным, личное с коллективным, изображаемое с действительным.

Исследователи традиционно выделяют три уровня восприятия городской среды [2, с. 195]:

1. Поэтика архитектурно-ландшафтной среды (эмоциональный анализ, чувственный, анализ воображаемого пространства).

2. Эстетика городской среды (чтение визуальных, слуховых, обонятельных и других кодов, установление отношений между формами и эмоциями, между эстетикой и поэтикой воспринимаемого). Из числа кодов, актуальных для архитектурно-ландшафтной среды малых городов, следует назвать линии/пересечения, оси, планы и объемы разного масштаба, контрасты, чередования, ритмы, (не)прозрачности и пр.

3. Когнитивный уровень понимания (установление системных отношений между эмоциями и поэтикой, видимыми архитектурно-ландшафтными формами и эстетикой, знанием и пониманием среды). Результат в большой степени зависит от уровня общей культуры субъекта восприятия.

Российская Федерация – одна из самых урбанизированных стран мира (более 75 % городского населения). Многолетние процессы перетока населения в большие и малые города привели к появлению 13–15 агломераций, определяющих современный облик государства. Каждая из этих агломераций также обладает моноцентрическим характером

системы расселения. Например, в Московской агломерации более 70 % населения региона сосредоточено в ее центре, в Новосибирской – более 50 % в центре.

С одной стороны, при концентрации процессов роста в центре агломерации образуется масса преимуществ (социокультурного, экономического, демографического характера и др.), а с другой – неизбежно возникают и усиливаются проблемы экологического, социального, национального плана и пр. Быстро меняющаяся эпидемиологическая ситуация, новые возможности цифровой экономики (прежде всего работы в удаленном доступе), совершенствование дорожно-транспортной инфраструктуры ставят на первое место задачу более полного вовлечения малых городов в жизнь страны. Усиливается интерес к внутреннему туризму, путешествиям по регионам, в которых малые города и исторические поселения обладают особенностями, определяющими рассматриваемые процессы. Например, рекреационный потенциал без малого полутора десятков исторических поселений Тверского региона, основанных в XII–XV вв., во многом обусловлен их расположением на берегах рек и озер. В ходе исторического развития большинства населенных мест, расположенных в системе водного фронта вдоль реки или водоема, именно береговые территории обрели многовековую освоенность. При этом очевидна их деградация.

С акваториями и береговыми территориями связаны самые выразительные панорамы и контрастное сочетание различных функций [1, 2]. Актуальность преобразования этих территорий связана также с тем, что возможны два важных процесса:

полное сохранение сложившихся планировочных решений исторической части городов, уникальных объектов наследия, характерной средовой застройки;

создание/восстановление новых привлекательных ландшафтов.

В конечном счете именно состояние участков, обладающих большим природным потенциалом, позволяет судить о степени гуманизации городской среды, ее соответствии запросам современного общества [3, 4].

В стране реализуется национальный проект «Жилье и городская среда», в рамках которого проводятся всероссийские конкурсы проектов создания комфортной городской среды в малых городах и исторических поселениях, поэтому преобразование береговых территорий и акваторий в центральной части исторических поселений играет особую роль в оздоровлении рассматриваемой среды и поддержании стабильности ландшафта. Программы градостроительного развития охватывают широкий диапазон преобразований береговых участков (от сложных работ намыва территорий и пластики ландшафта до самых простых и дешевых приемов регенерации участков вблизи рек и водоемов).

Извилистая форма небольших рек (очень важных знаковых систем городского ландшафта) обусловлена наличием градиента скоростей потока, неоднородностью грунта дна, боковым размывом русла. Характер течения спокойный, поэтому процесс меандрирования (закономерных деформаций излучин), как правило, выражен слабо. Возникающие закономерные плановые деформации речных излучин приводят к образованию стариц – водоемов в пойме, постепенно заиляющихся в результате отчленения участков русла. Со временем старицы мелеют, зарастают камышом и кустарником, превращаются в болото или полностью исчезают.

Коэффициент извилистости реки определяется как отношение длины участка фарватера АБ к расстоянию между точками А и Б по прямой между ними (рисунок). Чем выше коэффициент извилистости, тем больше извилистость (и наоборот). Малые реки, характерные для исторических поселений Тверской области, более извилисты, чем крупные. Для Тверского региона диапазон значений коэффициента извилистости от 2,528 (г. Кашин) до 1,349 (г. Тверь).

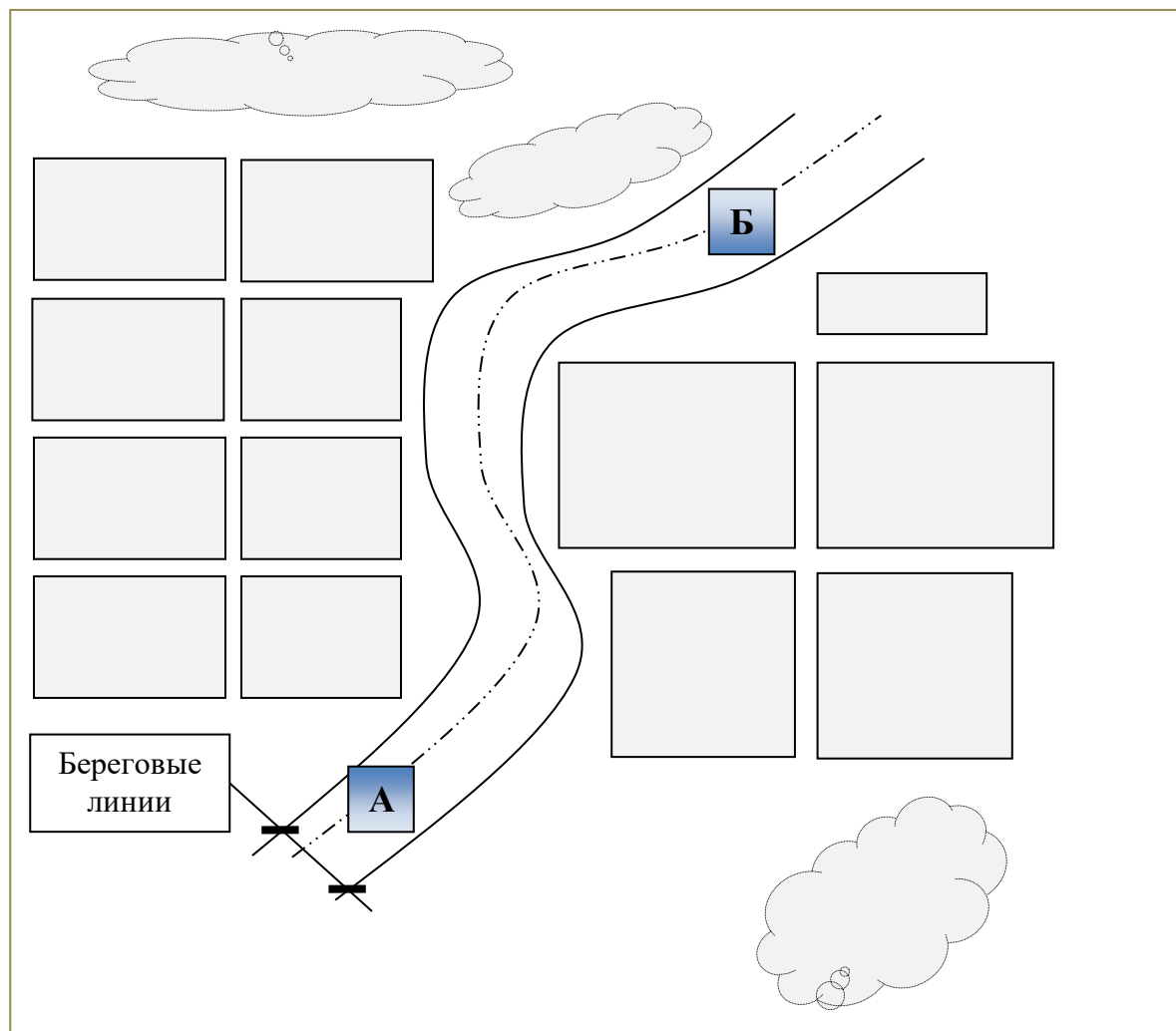


Схема квартальной застройки центра исторического поселения:
А и Б – точки пересечения городской черты с фарватером реки

Таким образом, архитектурно-ландшафтная среда исторических поселений Тверского региона характеризуется сочетанием спокойного рельефа и извилистых рек. Как уже отмечалось, все без исключения исторические города региона расположены на берегах рек и озер. Плоские берега городских водоемов и водотоков зрительно расширяют и обогащают пространство. Акватория, в отличие от преобладающих в природе сложных форм, является единственным элементом, способным образовать горизонтальную плоскость, цвет которой меняется в зависимости от погодно-климатических условий (из-за отражения света при дневном и вечернем небе), а также цвета поверхности льда или

снежного покрова. Среди всего многообразия архитектурных сооружений береговой полосы особое место занимают мосты, пристани, дебаркадеры, причалы и пр. Обилие типов сооружений и использованных материалов определяется характером примыкающего рельефа, шириной протока, формой береговой линии и функциональным назначением [5, 6]. Прибрежные зоны малых исторических городов не застроены крупными зданиями или сооружениями (в отличие от подобных территорий в крупных городах). Руслу малых рек обладают извилистым характером, что требует особых планировочных решений (как минимум пешеходных мостов).

Основными задачами преобразования береговых территорий в малых городах и исторических поселениях являются:

- а) ландшафтная пластика наиболее посещаемых участков водного фронта;
- б) комплексное благоустройство;
- в) обеспечение доступа населения к водному пространству в поселении.

ВЫВОДЫ

Сложная экономическая ситуация и отсутствие устойчивого интереса к внутригородским прибрежным территориям малых исторических городов Тверского региона привели к их очевидной деградации, уменьшили возможности использования для рекреационных целей горожан и посещения туристами. Таким образом, актуален пересмотр их роли в концепции организации комфортной городской среды и маркетинга имиджа поселений рассматриваемого типа.

Сопоставление семиотики больших и малых городов может быть выполнено на основе комплекса методов сравнительно-исторического, географического, системно-структурного, а также интерпретирующего и компаративного анализа. Архитектурно-ландшафтная среда исторических поселений Тверского региона интерпретировалась как система знаков, что позволило выделить особую значимость расположения таких поселений на малых извилистых реках. Использование потенциала переформления контуров береговой линии и пластической обработки прилегающих участков открывает новые возможности для создания многофункциональной и комфортной городской среды исторических поселений Тверского региона.

В качестве основных приемов переустройства прибрежных территорий должны рассматриваться разграничение транспортных и пешеходных путей; совершенствование характера озеленения и геопластики прибрежных зон; определение ведущих композиционных центров (преобразование утративших свое значение зданий и сооружений) современными средствами достижения архитектурно-ландшафтной выразительности и своеобразия исторической застройки.

Должны реализовываться следующие возможности: превращение акваторий и примыкающих участков в структурные элементы будущего рекреационного каркаса, обеспечивающего беспрепятственное перемещение горожан и туристов вдоль берегов; организация театрализованных действий и концертов под открытым небом; композиционное разнообразие и системный характер визуального ряда участков береговой линии (разной степени открытости/закрытости).

Соразмерное масштабам исторического поселения преобразование береговых участков и акваторий открывает дополнительные возможности для создания зон полноценного контакта туристов и горожан с природной средой, а также повышения экологической устойчивости и эстетической привлекательности территорий, находящихся вблизи исторического центра малого поселения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров В.В., Коваль И.М. Мифосимволизм архитектуры. М.: Либроком. 2009. 264 с.
2. Семиотика пространства / под ред. А.А. Барабанова. Екатеринбург: Архитектон. 1999. 689 с.
3. Архитектурная композиция садов и парков / под общ. ред. В.П. Вергунова. М.: Стройиздат. 1980. 254 с.
4. Лавренова О.А. Семантика культурного ландшафта. Дисс. ... д-ра филос. н. М., 2010. 370 с.
5. Пляскина О.А., Кудряшова Е.В., Федоров В.В. Кадастр прибрежных территорий города и формирование экологического каркаса // *Инновационные исследования в современном мире: теория, методология, практика: Сборник статей по материалам II Международной научно-практической конференции*. Уфа: НИЦ «Вестник науки». 2020. С. 202–209.
6. Кудряшова У.И., Пляскина О.А., Федоров В.В. Кадастр и маркетинг имиджа прибрежных территорий города // *Инновационные исследования в современном мире: теория, методология, практика: Сборник статей по материалам II Международной научно-практической конференции*. Уфа: НИЦ «Вестник науки». 2020. С. 196–202.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФЕДОРОВ Виктор Владимирович – доктор 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. Архитектурно-ландшафтная среда исторических поселений: от семантики к прагматике // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 2 (10). С. 30–36.

**ARCHITECTURAL AND LANDSCAPE ENVIRONMENT
OF HISTORICAL SETTLEMENTS: FROM SEMANTICS TO PRAGMATICS**

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

Abstract. From the point of view of semiotics, the potential for the development of small historical cities in the central part of Russia is considered (on the example of the Tver region). The natural-climatic and socio-cultural features of the region are determined. A characteristic feature of small historical settlements is the presence of rivers and reservoirs. The role of water areas and coastal territories in creating a comfortable urban environment is analyzed. It is noted

that the re-design of the contours of the coastline and the plastic treatment of adjacent areas opens up new opportunities for creating a multifunctional and comfortable environment. It is shown that the transformation of water areas and adjacent areas into structural elements of the future recreational framework ensures the unhindered movement of citizens and tourists along the shores; the organization of theatrical actions and concerts in the open air; the compositional diversity and the systematic nature of the visual series of sections of the coastline.

Keywords: small historical city, water area, coastline, reconstruction, coastal territories.

REFERENCES

1. Fedorov V.V., Koval I.M. Mifosimvolizm arhitektury [Mythosymbolism of architecture]. Moscow: Librokom. 2009. 264 p.
2. Semiotika prostranstva [The semiotics of space] / under the editorship of A.A. Barabanov. Yekaterinburg: Architecton, 1999. 689 p.
3. Architectural composition of gardens and parks / under the general ed. V.P. Vergunov. Moscow: Stroyizdat. 1980. 254 p.
4. Lavrenova O.A. Semantics of the cultural landscape. Dokt. Diss. (Philos). Moscow. 2010. 370 p. (In Russian).
5. 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: Theory, Methodology, Practice: II International Scientific and Practical Conference*. Ufa: NIC Vestnik nauki. 2020, pp. 202–209. (In Russian).
6. 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: II International Scientific and Practical Conference*. Ufa: NIC Vestnik nauki. 2020, pp. 196–202. (In Russian).

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 of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vvf322@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Fedorov V.V., Fedorov M.V. Architectural and landscape environment of historical settlements: from semantics to pragmatics // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 2 (10), pp. 30–36.

УДК 624.046.3

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВОСТИ
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ИЗ СТАЛИ
ДЛЯ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ НАГРУЖЕНИЯ
В ПРОГРАММЕ ДЛЯ ЭВМ**

С.В. Черемных

Тверской государственной технической университет (г. Тверь)

© Черемных С.В., 2021

Аннотация. В статье рассмотрена теория устойчивости оболочек за пределом упругости. Отмечен важный аспект: так как в зависимости от истории процесса нагружения упругопластической системы ее окончательная деформация, соответствующая одной и той же внешней нагрузке, различная, то при исследовании задач неупругой устойчивости следует исходить из анализа простых комбинированных процессов нагружения, приводящих к различным критическим деформациям. Изучен не только вопрос об истории нагружения, которая приводит к минимальному значению критических нагрузок, но и вопрос о выборе и осуществлении такой истории нагружения данной системы, которая дает для нее максимальное значение предела устойчивости и несущей способности. Предложены инновационные методы решения задачи устойчивости при простом пропорциональном нагружении для прямолинейных траекторий, реализуемые в разработанной программе для ЭВМ.

Ключевые слова: программа для ЭВМ, устойчивость, бифуркация, оболочка, простое нагружение, траектория, деформация, механика.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-37-46

ВВЕДЕНИЕ

Современная идея рационального применения материалов путем снижения коэффициентов запаса прочности и устойчивости может быть реализована как благодаря совершенствованию методов расчета с помощью современных программных комплексов, так и благодаря использованию ресурса материалов с учетом упругопластической стадии деформирования. Одним из наиболее оптимальных сечений в современном строительстве является трубчатое. К такому сечению могут относиться стальные электросварные прямошовные трубы, выполненные по ГОСТ 10704-91, трубы стальные бесшовные и сварные холоднодеформированные общего назначения, выполненные по ГОСТ 32678-2014, и трубы стальные водогазопроводные, изготовленные согласно ГОСТ 3262-75. Принятые в данных государственных стандартах сечения могут использоваться для различного рода требований. Круглые сечения используют на объектах нефтегазовой и химической промышленности, в лабораториях, авиастроении, машиностроении, промышленном и гражданском строительстве. Трубчатые образцы обладают различными свойствами и разным составом материалов, из которых они изготовлены [3–8].

В учебных и научных целях для изучения сечений круглой формы в настоящее время используют образцы, выполненные в виде тонкостенных цилиндрических оболочек из сталей различных марок, таких как Ст3кп, Ст4пс, Ст5сп, которые относятся по ГОСТ 380-2005 к углеродистым сталям обыкновенного качества. Стоит отметить, что применение именно тонкостенных оболочек позволяет раскрыть весь потенциал круглого замкнутого сечения, изучить его поведение при различных нагрузках и воздействиях, систематизировать полученные решения и сделать ряд выводов о применимости данных материалов для развития современной строительной механики и механики деформируемого твердого тела [9, 10].

Исследователю необходим, помимо образцов для испытаний, современный комплекс, благодаря которому можно в полной мере раскрыть все свойства испытываемого образца. Этим требованиям соответствует автоматизированный расчетно-экспериментальный комплекс СН-ЭВМ, разработанный в лаборатории механических испытаний кафедры сопротивления материалов, теории упругости и пластичности Тверского государственного технического университета. Большое количество задач на устойчивость за пределом упругости при комбинированном нагружении на данной испытательной машине решили ученые-механики тверской научной школы, образовавшейся на основе теории В.Г. Зубчанинова.

Эксперименты по определению точки потери устойчивости тонкостенных цилиндрических оболочек при простом нагружении за пределом упругости стали первым шагом в опытной проверке физической достоверности различных вариантов теории пластичности, используемых при решении задач устойчивости оболочек. Однако эти исследования проводились на ограниченном классе плоских траекторий, например при сжатии с кручением или при сжатии с внутренним давлением, передаваемым на оболочку. Проблема устойчивости существенно нелинейна, а потому ее линейный анализ следует понимать только как аппроксимацию истинного явления.

Накопление новых теоретических и экспериментальных данных, которые были получены при изучении устойчивости тонкостенных упругопластических оболочечных систем в сложном напряженном состоянии, имеет особое значение для разработки эффективных методов инженерного расчета сооружений [11–15]. Исследованные методы впоследствии будут использоваться в системе автоматизированного проектирования и обеспечат максимальную достоверность расчета тонкостенных конструкций.

В современных программных комплексах задействован ряд алгоритмов, с помощью которых решают задачи устойчивости, опираясь на различные теории. Наиболее полной из этих теорий является теория устойчивости А.А. Ильюшина, однако программ ЭВМ, в которых учтены все особенности простого нагружения в момент потери устойчивости оболочек, не существует.

Согласно ст. 1261 Гражданского кодекса, программой для ЭВМ является представленная в объективной форме совокупность данных и команд, предназначенных для функционирования ЭВМ и других компьютерных устройств в целях получения определенного результата, включая подготовительные материалы, полученные в ходе разработки программы для ЭВМ, и порождаемые ею аудиовизуальные отображения.

В данной работе рассматривается соответствие разработанного программного комплекса ЭВМ теоретическим расчетам для решения задачи устойчивости при простом нагружении оболочек из стали без и с учетом разгрузки материала для пропорциональных

процессов докритического нагружения. Приведены примеры программ расчетов упругопластических оболочек на устойчивость, которые выступают наиболее полными иллюстрациями автоматизированных решений поставленных задач.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение и оценка влияния простого нагружения на напряженно-деформированное состояние в цилиндрических тонкостенных оболочках постоянной толщины в процессах докритического растяжения, сжатия и внутреннего давления – важные, актуальные задачи, решение которых необходимо для проектирования и оптимизации тонкостенных конструкционных материалов и изделий.

Рассмотрим теоретический аспект решения задачи устойчивости тонкостенной цилиндрической оболочки для процессов пропорционального нагружения за пределом упругости [16].

При принятых допущениях решение данной задачи сводится к решению задачи о собственных числах, на основе которой можно вычислить значение гибкости оболочки $i = 3R/h$ в зависимости от величины модуля вектора напряжений σ и параметров волнообразования m и n , реализующихся при потере устойчивости. При расчетах на основе теории устойчивости А.А. Ильюшина система алгебраических уравнений принимает вид:

$$\begin{aligned} i^2 \frac{\sigma}{Eg_1} \left(-K_* - \frac{EN_1^*}{2\sigma\theta} \lambda_m^4 \right) + i \frac{3}{2} \frac{N_1^* \Phi^*}{g_1 \theta} \lambda_m^2 K_* S_* &= \\ = (\lambda_m^2 + n^2)^2 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{g_2}{g_1} \right) K_*^2 + \frac{9}{8} \frac{N_1^* \Phi^{*2}}{g_1 \theta} K_*^2 S_*^2; & \quad (1) \\ C\theta = \frac{N_1^*}{2} \lambda_m^2 - \frac{3}{4} \frac{N_1^* \Phi^*}{i} K_* S_* & \end{aligned}$$

где E – модуль Юнга; m, n – целые числа, определяющие число полуволн в направлениях x_1 и x_2 соответственно (x_1 – в направлении образующей, x_2 – в окружном направлении); N – функция пластичности; Φ – функция напряжений;

$$\begin{aligned} K_* = \sigma_{11}^* + \sigma_{22}^* r^2 - 2\sigma_{12}^* r; \quad S_* = S_{11}^* r^2 + S_{22}^* + 2S_{12}^* r; \quad \sigma_{ij}^* = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma}; \quad S_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{\sigma}; \\ \theta = (\lambda_m^2 + n^2)^2 - \frac{3}{2} \left(1 - \frac{N_1^*}{P_1^*} \right) S_*^2; \quad C = \frac{B}{ER^2 A}; \quad \Phi^* = \frac{P_2^*}{P_1^*} - \frac{N_2^*}{N_1^*}; \quad \lambda_m = \frac{m\pi R}{L}; \\ g_1 = \frac{D_1}{D} = \frac{3}{2} \left(N_3^* - \frac{N_2^{*2}}{N_1^*} \right); \quad g_2 = \frac{D_2}{D} = \frac{3}{2} \left(P_3^* - \frac{P_2^*}{P_1^*} \right); \quad D = \frac{Eh^3}{9}; \\ N_m^* = \int_{-1}^{+1} \left(\frac{N}{2G} \right) z^{*(m-1)} dz^*; \quad P_m^* = \int_{-1}^{+1} \left(\frac{P}{2G} \right) z^{*(m-1)} dz^*; \quad P = \frac{d\sigma}{dS} \cdot \frac{1}{\cos \vartheta_1}; \quad z^* = \frac{z}{h}; \\ N_m = \int_{-h/2}^{h/2} Nz^{m-1} dz, \quad P_m = \int_{-h/2}^{h/2} Pz^{m-1} dz, \end{aligned} \quad (2)$$

где D_1 – пластическая жесткость оболочки.

Для определяющих функций пластичности принимаем аппроксимации

$$\begin{cases} N = 2G(1 - \omega), & P = 2G(1 - \lambda), & 0 \leq \vartheta_1 \leq \pi/2; \\ N = P = 2G, & & \pi/2 \leq \vartheta_1 \leq \pi, \end{cases} \quad (3)$$

где ω – параметр пластичности А.А. Ильюшина; λ – параметр разупрочнения.

В основу модифицированной теории устойчивости оболочек за пределом упругости В.Г. Зубчанинова [1] положено предположение, что бесконечно малое продолжение процесса, связанное с бифуркацией, является простым или локально простым. В этом случае

$$\dot{\sigma} = P\dot{\varepsilon}, \quad \dot{s}_{ij} = P\dot{\varepsilon}_{ij}, \quad (4)$$

где для зоны пластической догрузки $P = 2G_k$, а для зоны разгрузки $P = 2G$.

Основные уравнения задачи принимают вид [1, 2]:

$$\begin{cases} i^2 = \frac{Eg_2}{\sigma} (\lambda_m^2 + n^2)^2 \left[-K_* - \frac{EP_1^* \lambda_m^4}{2\sigma\theta} \right]^{-1}; \\ C\theta = \frac{P_1^*}{2} \lambda_m^2, \quad \theta = (\lambda_m^2 + n^2)^2. \end{cases} \quad (5)$$

При решении выражения (5) можно получить новые уравнения задачи устойчивости по теории пластин и оболочек в момент бифуркации, позволяющие оценить достоверность известных решений по другим теориям, например теории устойчивости А.А. Ильюшина (см. формулу (1)).

Уравнения (1)–(5) являются основными выдержками из математически сложной задачи, которая подробно раскрывается в работах [1, 2, 16–18]. Для облегчения процесса самого расчета было предложено выполнить представленные решения на ЭВМ на языке программирования Visual Basic for Applications (VBA). Этот язык позволяет в кратчайшие сроки проводить верификацию всех теоретических расчетных решений на основе экспериментальных данных для пропорциональных процессов докритического нагружения цилиндрических оболочек за пределом упругости.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Программа выполняет расчет на устойчивость цилиндрических оболочек, изготовленных из материалов со сложными механическими свойствами, и может быть применена для расчета элементов в строительных сооружениях. Она предназначена для решения задачи бифуркации оболочки из стали для пропорциональных процессов в момент потери устойчивости, помогает обработать экспериментальные данные, полученные при процессах нагружения и деформирования материалов, и вывести зависимости для функций, определяющих векторные и скалярные свойства этих материалов. Иными словами, программа отвечает на вопрос о бифуркации оболочки при процессах пропорционального докритического нагружения оболочки осевой сжимающей силой, крутящим моментом и внутренним давлением в девиаторном пространстве деформаций.

Расчеты выполнены для экспериментально реализованных Ч. Джоном процессов на оболочках из стали 45 [1, 2, 16]. Испытано 14 оболочек. Траектории нагружения

приведены на рис. 1 и 2. На рис. 1 оси S_1 – S_3 маркированы как компоненты вектора напряжения S в зависимости от направления траектории, оси \mathcal{E}_1 – \mathcal{E}_3 на рис. 2 – компоненты вектора деформации \mathcal{E} . Экспериментальные точки потери устойчивости на рис. 1 и 2 обозначены как П1–П14.

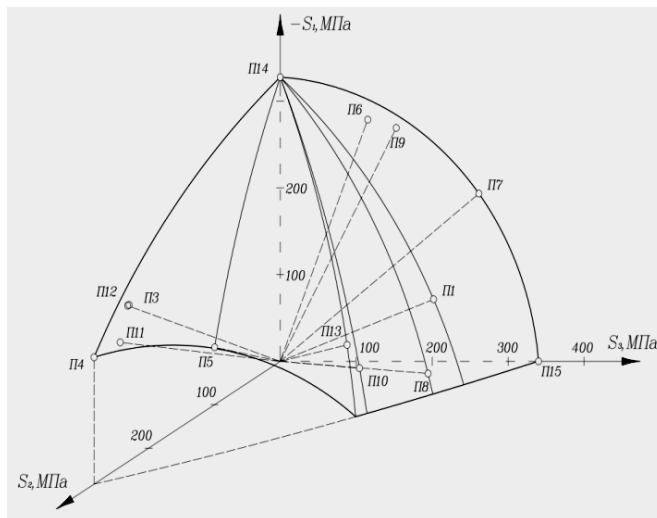


Рис. 1. Поверхность критических напряжений оболочек из стали 45

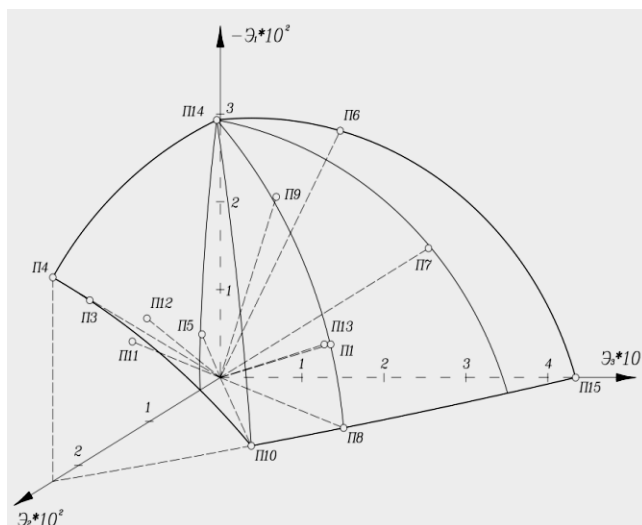
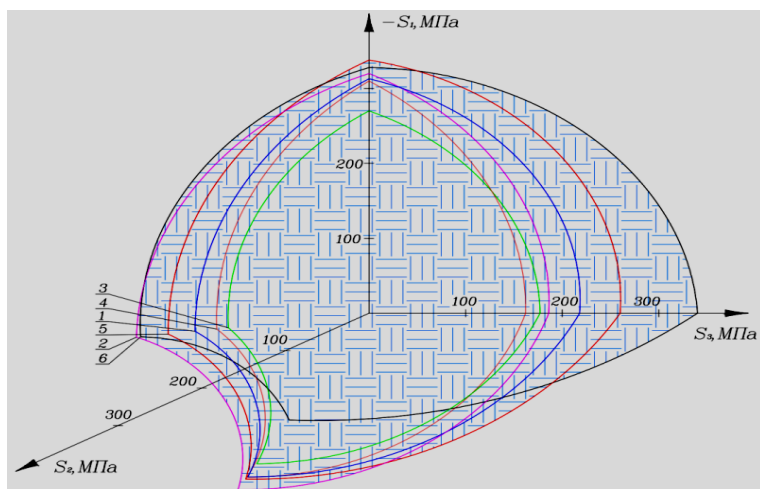


Рис. 2. Поверхность критических деформаций оболочек из стали 45

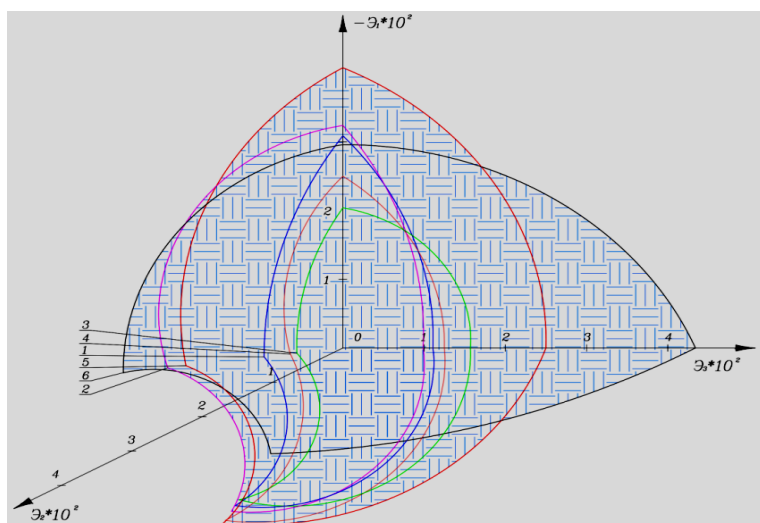
При решении задачи устойчивости цилиндрической оболочки для пропорциональных процессов докритического нагружения во время расчета на ЭВМ в качестве исходных данных вводятся модуль сдвига материала, длина оболочки, радиус оболочки, деформации для первой точки, количество точек, шаг по деформациям, осуществляется выбор варианта теории устойчивости и критериев сравнения по координате границы раздела зон. После ввода данных задаются параметры напряженного состояния и происходит обнуление массива гибкостей при выполнении начальных условий. Далее выполняются непосредственно решение задачи устойчивости и вывод исходных данных

для построения поверхности критических деформаций и напряжений, которые необходимы для оценки влияния на устойчивость нагружения.

Поверхности проецируются на экспериментальной поверхности (см. рис. 1, 2), выполненной для 14 процессов на оболочках из стали 45, и представлены кривыми 1–4 на рис. 3 [16].



а



б

Рис. 3. Поверхность: а – критических напряжений; б – критических деформаций;
1–6 – кривые поверхностей

Для решения задачи устойчивости оболочки с учетом сложного характера деформирования при сложном докритическом нагружении (поверхность 5 на рис. 3) для пропорциональных процессов при выполнении расчета на ЭВМ в качестве исходных данных вводятся модуль сдвига материала, радиус оболочки, начальное значение модуля деформаций, шаг по деформациям, длина оболочки, материальные параметры, критерий сравнения, а также осуществляется выбор варианта теории устойчивости. После этого

определяются параметры напряженного состояния, выполняются очистка массива гибкостей, расчет начальных условий и аппроксимация диаграммы.

В нулевом приближении решается алгебраическое уравнение при чисто-пластической бифуркации, устанавливаются промежуточные параметры нулевого приближения, осуществляются итерационный процесс, расчет интегралов, решение квадратного уравнения в первом приближении, определяются промежуточные параметры первого приближения и решается задача устойчивости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программа ЭВМ предназначена для изучения воздействия нагружения в момент бифуркации на устойчивость металлических оболочек из стали в механике деформируемого твердого тела. Была решена задача комплексного обоснования применяемой теории устойчивости цилиндрических оболочек с учетом простого и сложного нагружения, при этом были вычислены параметры устойчивости при сжатии, кручении, внутреннем давлении и комбинированном нагружении материала.

Результаты исследования, проведенного в статье, могут быть интересны специалистам, занимающимся разработкой моделей пластичности, ресурса и надежности конструкций, использоваться в тестировании как отечественных, так и зарубежных программных комплексов, предназначенных для решения задач устойчивости тонкостенных конструкций, работающих за пределом упругости [17–19].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Охлопков Н.Л., Соколов С.А., Черемных С.В. Решение задачи бифуркации цилиндрической оболочки с учетом сложного характера деформирования в момент потери устойчивости при сложном докритическом нагружении // *Известия МГТУ «МАМИ». Серия 3: Естественные науки*. 2013. Т. 3. № 1 (15). С. 96–100.
2. 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.
3. Campello E.M.B., Pimenta P.M., Wriggers P. A triangular finite shell element based on a fully nonlinear shell formulation // *Computational Mechanics*. 2003. Vol. 31. No. 6, pp. 505–518. DOI: 10.1007/s00466-003-0458-8
4. Dong J., Zhao J., Shi K. Dynamic behavior and stability of prestressed arch-supported reticulate shell structure // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 150–151, pp. 188–193. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.150-151.188
5. Bochkarev A.V., Zemlyanukhin A.I., Mogilevich L.I. Solitary waves in an inhomogeneous cylindrical shell interacting with an elastic medium // *Acoustical Physics*. 2017. Vol. 63. No. 2, pp. 148–153. DOI: 10.1134/S1063771017020026
6. Sinha S.K., Zylka R.P. Vibration analysis of composite airfoil blade using orthotropic thin shell bending theory // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017. Vol. 121, pp. 90–105. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.12.012
7. Zareh M., Qian X. Kirchhoff-law shell formulation based on triangular isogeometric analysis // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2019. Vol. 347, pp. 853–873. DOI: 10.1016/j.cma.2018.12.034
8. Bakulin V.N., Konopelchev M.A., Nedbay A.Ya. Aeroelastic stability of a cylindrical shell of linearly varying thickness // *Doklady Physics*. 2019. Vol. 64. No. 9, pp. 360–364. DOI: 10.1134/S1028335819090015

9. Lavrencic M., Brank B. Hybrid-mixed shell finite elements and implicit dynamic schemes for shell post-buckling // *Advanced Structured Materials*. 2019. Vol. 110, pp. 383–412. DOI: 10.1007/978-3-030-17747-8_21
10. Chen Z.C., Li W.B., Zhu J.J., Wang X.M. Recovery experiment study of cylindrical 40CrMnSiB steel shell in intermediate phase of expanding fracture processes // *Bingong Xuebao. Acta Armamentarii*. 2018. Vol. 39. No. 11, pp. 2137–2144. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.11.007
11. Yudin A.S., Yudin S.A., Sigaeva T.V. Semi-inverse method in the problem of plastic deformation of cylindrical shell // *International Symposium on Physics and Mechanics of New Materials and Underwater Applications (Phenma-2014)*. 2015, pp. 341–351.
12. Mazharimousavi S.H., Halilsoy M., Amen S.N.H. Stability of spherically symmetric timelike thin-shells in general relativity with a variable equation-of-state // *International Journal of Modern Physics*. 2017. Vol. 26. № 14, p. 1750158.
13. Sofiyev A.Y. On the solution of the dynamic stability of heterogeneous orthotropic visco-elastic cylindrical shells // *Composite Structures*. 2018. Vol. 206, pp. 124–130.
14. Tomczyk B., Szczerba P.A. A new asymptotic-tolerance model of dynamic and stability problems for longitudinally graded cylindrical shells // *Composite Structures*. 2018. Vol. 202, pp. 453–481.
15. Van Dung D., Nga N.T., Vuong P.M. Nonlinear stability analysis of stiffened functionally graded material sandwich cylindrical shells with general sigmoid law and power law in thermal environment using third-order shear deformation theory // *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2019. Vol. 21. № 3, pp. 938–972.
16. 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.
17. 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
18. Cheremnykh S., Kuzhin M. Solution of the problem of stability of 40X steel shell: modelling and methods of structural analysis // *Journal of Physics Conference Series*. 2020. Vol. 1425, pp. 012191. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012191
19. Cheremnykh S.V., Skudalov P.O. SN-EVM unit for experimental studies of stability in circular cylindrical shells under combined loading // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 786, pp. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012011

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Черемных С.В. Решение задачи устойчивости цилиндрической оболочки из стали для пропорциональных процессов нагружения в программе для ЭВМ // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 2 (10). С. 37–46.

**SOLUTION OF THE PROBLEM OF STABILITY OF A CYLINDRICAL SHELL
MADE OF STEEL FOR PROPORTIONAL LOADING PROCESSES
IN A COMPUTER PROGRAM****S.V. Cheremnykh***Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The theory of stability of shells beyond the elastic limit is considered. Marked: since, depending on the history of the loading process of an elastic-plastic system, its final deformation corresponding to the same external load is different, the study of inelastic stability problems should proceed from the analysis of simple combined loading processes leading to various critical deformations. Not only the question of the loading history, which leads to the minimum value of critical loads, is considered, but also the question of choosing and implementing such a loading history of this system, which gives it the maximum value of the stability limit and load-bearing capacity. Innovative methods for solving the problem of stability under simple proportional loading for rectilinear trajectories in the direction of structural mechanics and mechanics of deformable solids, implemented in the developed computer program, are proposed.

Keywords: computer program, stability, bifurcation, shell, simple loading, trajectory, deformation, mechanics.

REFERENCES

1. Ohlopkov N.L., Sokolov S.A., Cheremnykh S.V. Solution of the problem of bifurcation of a cylindrical shell taking into account the complex nature of deformation at the moment of loss of stability under complex subcritical loading. *Izvestiya MGTU «MAMI». Seriya 3: Estestvennye nauki*. 2013. Vol. 3. No. 1 (15), pp. 96–100. (In Russian).
2. 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).
3. Campello E.M.B., Pimenta P.M., Wriggers P. A triangular finite shell element based on a fully nonlinear shell formulation. *Computational Mechanics*. 2003. Vol. 31. No. 6, pp. 505–518. DOI: 10.1007/s00466-003-0458-8
4. Dong J., Zhao J., Shi K. Dynamic behavior and stability of prestressed arch-supported reticulate shell structure. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 150–151, pp. 188–193. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.150-151.188
5. Bochkarev A.V., Zemlyanukhin A.I., Mogilevich L.I. Solitary waves in an inhomogeneous cylindrical shell interacting with an elastic medium. *Acoustical Physics*. 2017. Vol. 63. No. 2, pp. 148–153. DOI: 10.1134/S1063771017020026.
6. Sinha S.K., Zylka R.P. Vibration analysis of composite airfoil blade using orthotropic thin shell bending theory. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017. Vol. 121, pp. 90–105. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2016.12.012
7. Zareh M., Qian X. Kirchhoff–Love shell formulation based on triangular isogeometric analysis. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2019. Vol. 347, pp. 853–873. DOI: 10.1016/j.cma.2018.12.034
8. Bakulin V.N., Konopelchev M.A., Nedbay A.Ya. Aeroelastic stability of a cylindrical shell of linearly varying thickness. *Doklady Physics*. 2019. Vol. 64. No. 9, pp. 360–364. DOI: 10.1134/S1028335819090015

9. Lavrencic M., Brank B. Hybrid-mixed shell finite elements and implicit dynamic schemes for shell post-buckling. *Advanced Structured Materials*. 2019. Vol. 110, pp. 383–412. DOI: 10.1007/978-3-030-17747-8_21
10. Chen Z.C., Li W.B., Zhu J.J., Wang X.M. Recovery experiment study of cylindrical 40CrMnSiB steel shell in intermediate phase of expanding fracture processes. *Binggong Xuebao*. 2018. Vol. 39. No. 11, pp. 2137–2144. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.11.007
11. Yudin A.S., Yudin S.A., Sigaeva T.V. Semi-inverse method in the problem of plastic deformation of cylindrical shell. *International Symposium on Physics and Mechanics of New Materials and Underwater Applications (Phenma-2014)*. 2015, pp. 341–351.
12. Mazharimousavi S.H., Halilsoy M., Amen S.N.H. Stability of spherically symmetric timelike thin-shells in general relativity with a variable equation-of-state. *International Journal of Modern Physics*. 2017. Vol. 26. No. 14, p. 1750158.
13. Sofiyev A.Y. On the solution of the dynamic stability of heterogeneous orthotropic visco-elastic cylindrical shells. *Composite Structures*. 2018. Vol. 206, pp. 124–130.
14. Tomczyk B., Szczerba P.A. A new asymptotic-tolerance model of dynamic and stability problems for longitudinally graded cylindrical shells. *Composite Structures*. 2018. Vol. 202, pp. 453–481.
15. Van Dung D., Nga N.T., Vuong P.M. Nonlinear stability analysis of stiffened functionally graded material sandwich cylindrical shells with general sigmoid law and power law in thermal environment using third-order shear deformation theory. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2019. Vol. 21. No. 3, pp. 938–972.
16. 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).
17. 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
18. Cheremnykh S., Kuzhin M. Solution of the problem of stability of 40X steel shell: modelling and methods of structural analysis. *Journal of Physics Conference Series*. 2020. Vol. 1425, pp. 012191. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012191
19. Cheremnykh S.V., Skudalov P.O. SN-EVM unit for experimental studies of stability in circular cylindrical shells under combined loading. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 786, pp. 012011. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012011

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Cheremnykh S.V. Solution of the problem of stability of a cylindrical shell made of steel for proportional loading processes in a computer program // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 2 (10), pp. 37–46.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 674.093

**АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ОСАДКОВ,
ВЫПАВШИХ В ТВЕРИ В 2016–2020 ГГ.***Ф.В. Качановский**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Качановский Ф.В., 2021

Аннотация. Выполнен статистический анализ динамики удельной электропроводности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 2016–2020 гг. Подтверждена работоспособность построенной ранее (по результатам наблюдений 2016–2019 гг.) математической модели статистического ряда удельной электропроводности осадков. Установлено, что удельная электропроводность в 2020 г. продолжает расти.

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

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-47-56

Удельная электропроводность воды, мкСм/см, используется в наблюдениях за состоянием водной среды и служит суммарным индикатором антропогенного воздействия [1]. Лаборатория мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии с 2016 г. проводит наблюдения за электропроводностью атмосферных осадков, выпадающих в Твери. За пять лет (2016–2020 гг.) произведено 640 измерений (около 11 измерений в месяц). Интервалы между срочными измерениями изменяются от одних суток до двух декад.

Временная последовательность (пятилетних наблюдений) срочных значений удельной электропроводности, здесь и далее обозначаемая как sw , представлена на рис. 1. Значения sw группируются в основном в интервале 0–30 мкСм/см, хотя отдельные редкие «выбросы» превышают 70 мкСм/см.

Одновременно с наблюдениями за sw наблюдаются также показатель кислотности осадков pH , количество выпадающих осадков pre и температура воздуха t . Статистический анализ электропроводности атмосферных осадков начат в 2019 г., результаты анализа четырехлетних наблюдений опубликованы в статьях [1, 2].

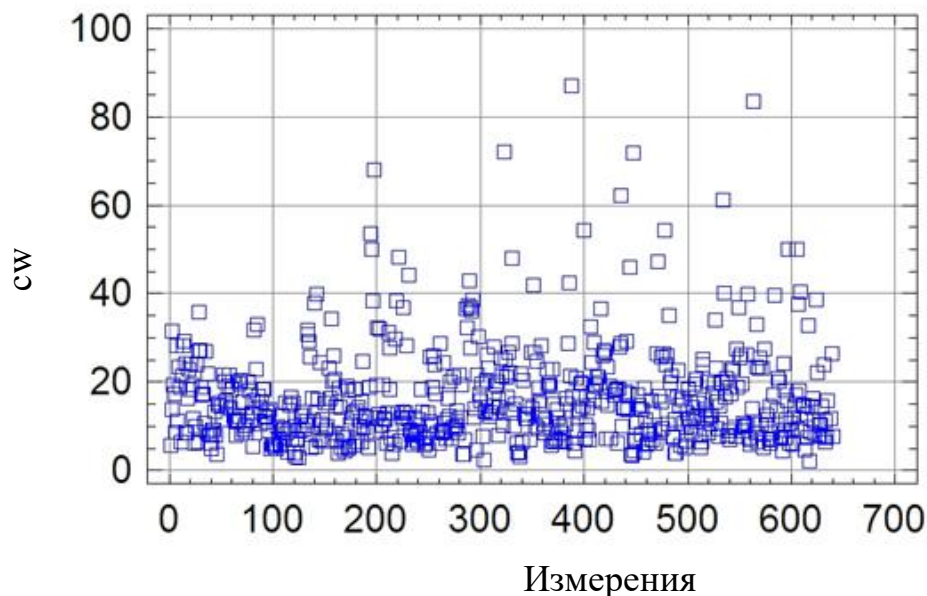


Рис. 1. Ряд срочных значений удельной электропроводности c_w (2016–2020 гг.)

В статье представлены результаты анализа удельной электропроводности атмосферных осадков c_w , выпавших в Твери за последние пять лет (в 2016–2020 гг.).

Последовательность c_w рассматривается как нестационарный временной ряд [3]. Наибольший практический интерес представляет тренд ряда. В качестве модели тренда еще в начале исследований, в 2019 г. (т. е. для четырехлетнего ряда – с 2016 по 2019 г. включительно), была принята по содержательным соображениям полиномиальная кривая регрессии. Характер значений c_w показывает (см. рис. 1), что для предварительного анализа короткого (продолжительностью четыре-пять лет) ряда приемлемы модели первого и второго порядка.

Уравнения моделей имеют вид:

$$c_w = 15,2352 + 0,00274712 \cdot n; \quad (1)$$

$$c_w = 14,486 + 0,00708704 \cdot n - 0,00000449625 \cdot n^2, \quad (2)$$

где n – порядковый номер члена ряда.

Уравнения (1) и (2) свидетельствуют о медленном росте значений c_w с течением времени, причем в квадратической модели наблюдается некоторое замедление роста, на что указывает знак «минус» в уравнении (2).

Установлена (для пятилетнего ряда) умеренно слабая положительная связь между срочными значениями удельной электропроводности c_w и показателя кислотности pH , оцениваемая коэффициентом корреляции 0,198448 (на доверительном уровне 95 %). Увеличение электропроводности c_w при росте показателя pH (рис. 2) означает, что электропроводность осадков увеличивается при снижении их кислотности. У среднемесячных значений amc_w и $ampH$ эта связь проявляется более отчетливо и характеризуется несколько большим коэффициентом корреляции (0,245955).

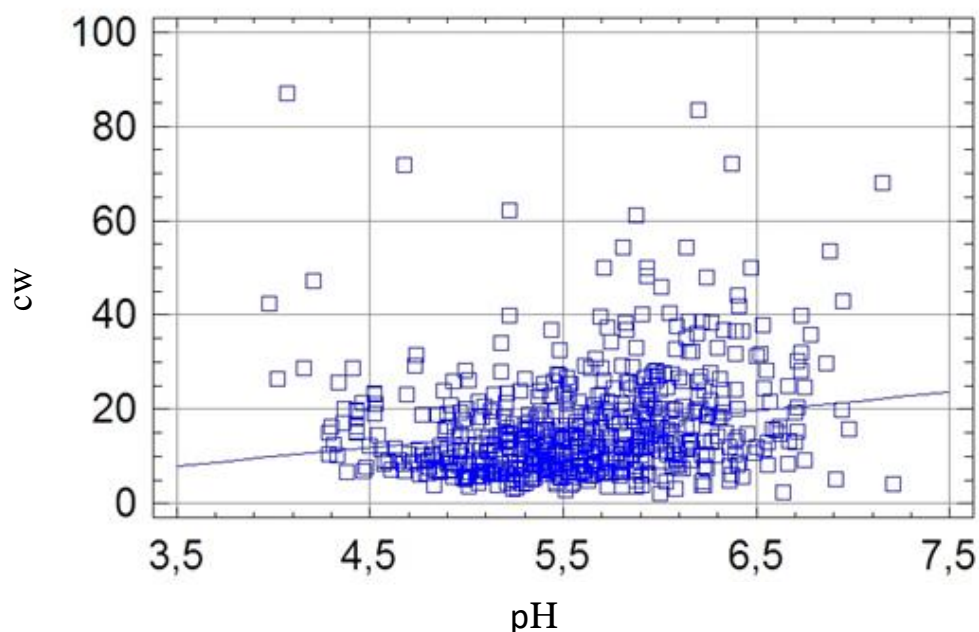


Рис. 2. Связь срочных значений $св$ и показателя кислотности осадков $рН$ (2016–2020 гг.)

Относительно слабая связь удельной электропроводности $св$ и суточного количества выпадающих осадков pre , мм, установленная в результате пятилетних наблюдений, характеризуется отрицательным коэффициентом корреляции: $-0,229997$ (на 95%-м уровне доверительной вероятности). Связь показана на рис. 3.

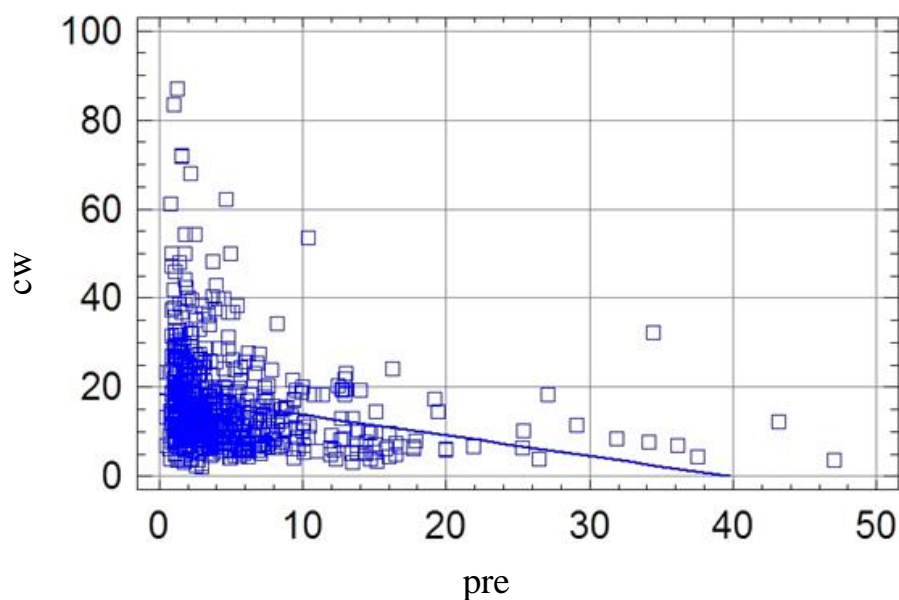


Рис. 3. Связь срочных значений электропроводности $св$ и суточного количества осадков pre (2016–2020 гг.)

Уравнение связи имеет вид

$$cw = 18,4397 - 0,463309pre. \quad (3)$$

Отметим, что связь, описываемая уравнением (3), несколько сильнее полученной для четырехлетнего ряда наблюдений [2], где коэффициент корреляции cw и pre составляет лишь $-0,210906$. В обоих случаях рост количества осадков приводит к уменьшению их электропроводности. Убывание cw при увеличении количества выпадающих осадков связано, по-видимому, с разбавлением атмосферных электролитов осадками.

Установлена относительно слабая положительная связь (рис. 4) электропроводности cw со среднесуточными температурами воздуха t , град.

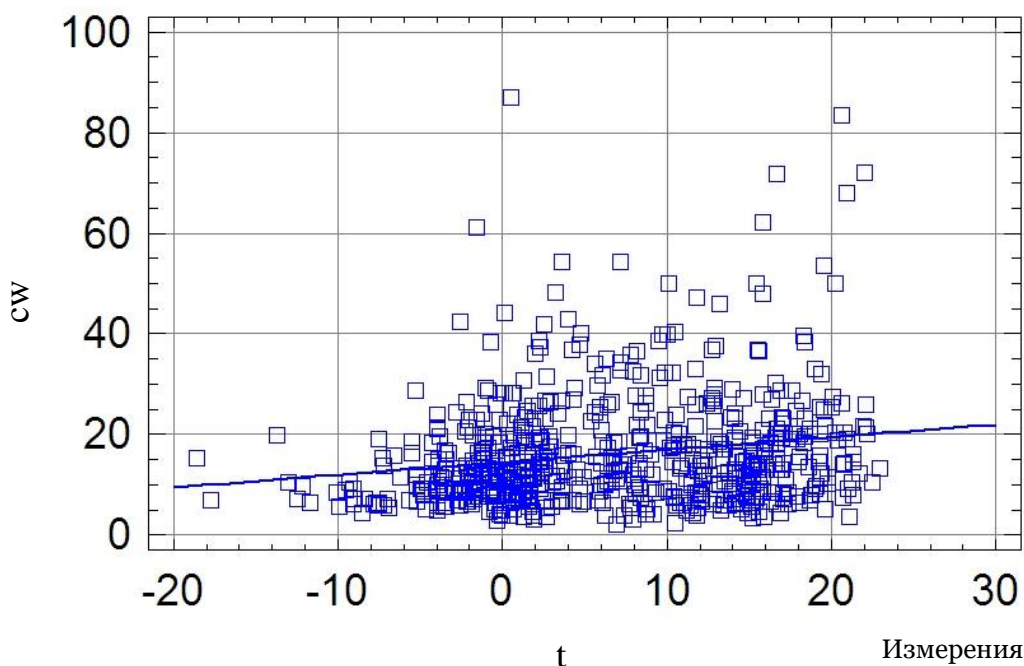


Рис. 4. Связь срочных значений электропроводности cw и среднесуточных температур воздуха t (2016–2020 гг.)

Коэффициент корреляции (для пятилетнего ряда) равен $0,186059$, уравнение связи имеет вид

$$cw = 14,4499 + 0,249723t.$$

Связь среднемесячных величин электропроводности $amcw$ и температур amt выражена сильнее: ей соответствует коэффициент корреляции $0,265817$.

Переход от наблюдавшихся в течение четырех лет [2] (срочных) значений cw к среднемесячным $amcw$ позволил рассматривать совокупность среднемесячных значений удельной электропроводности как нестационарный временной ряд [3] из 48 членов (месяцев) с постоянным шагом. Для пятилетних наблюдений ряд состоит из 60 членов. Пятилетний ряд $amcw$ показан на рис. 5.

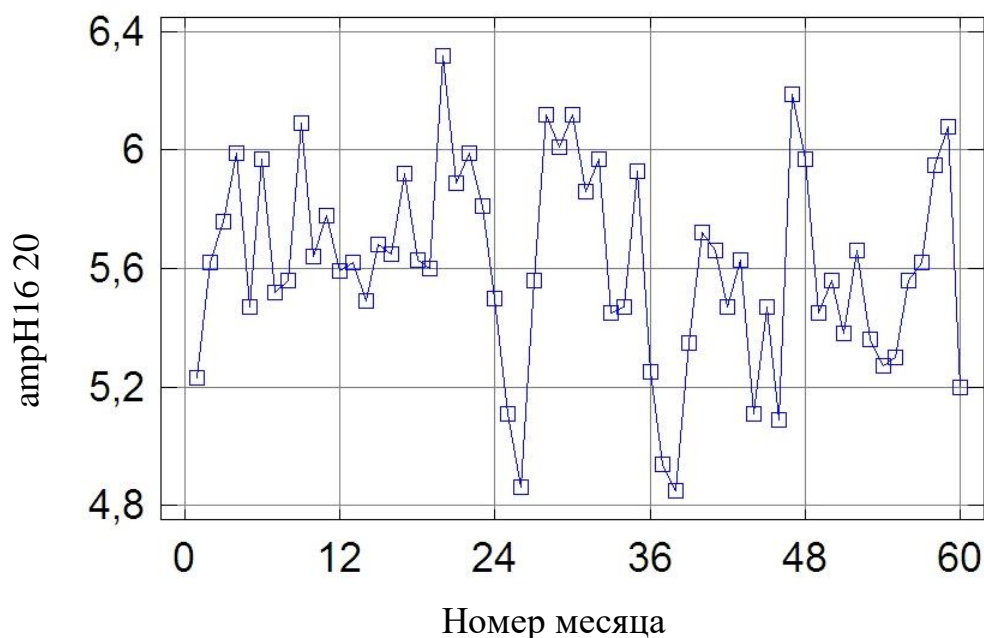


Рис. 5. Ряд среднемесячных значений удельной электропроводности $amcsw$ (2016–2020 гг.)

Такой переход дал возможность применить к ряду $amcsw$ существующие методы статистического анализа [3] и обнаружить некоторые важные свойства исследуемой величины. Аддитивная модель ряда $amcsw$ состоит из четырех компонент: тренда, циклической, сезонной и случайной. При построении модели ряда $amcsw$ видимая (наблюдаемая) изменчивость ряда разделена на закономерную (детерминированную) d_t и случайную ε_t составляющие:

$$amcsw_t = d_t + \varepsilon_t.$$

Закономерная составляющая d_t представлена как функция времени. Для описания случайной составляющей ε_t необходим статистический подход.

Закономерная составляющая d_t , в свою очередь, представлена трехчленной аддитивной моделью [3]:

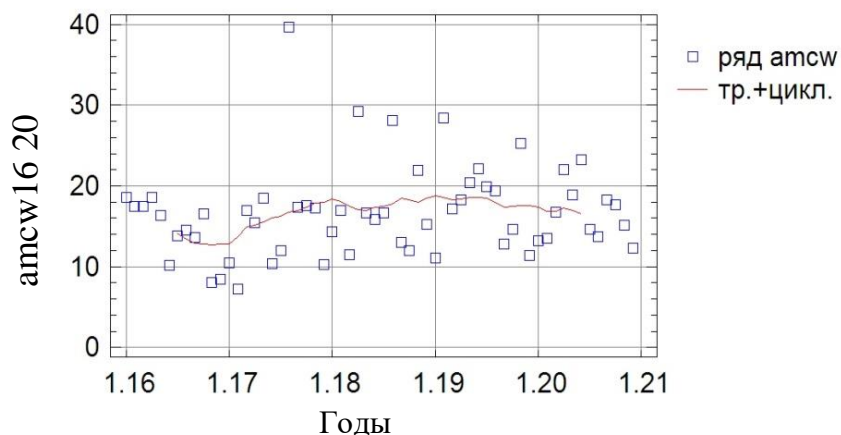
$$d_t = tr_t + c_t + s_t, \quad (4)$$

где tr_t , c_t , s_t – тренд, циклическая и сезонная компоненты соответственно.

Выполнена декомпозиция [3] ряда $amcsw$. На ее первом этапе определена сумма trc_t – двух первых членов уравнения (4):

$$trc_t = tr_t + c_t.$$

Суммарная компонента trc_t (показана на рис. 6) получена сглаживанием исходного ряда $amcsw$ с помощью простого арифметического скользящего среднего с интервалом сглаживания 12 значений. При этом сглаженный ряд стал короче исходного на 12 членов (оказался «обрезанным» на 6 членов в начале ряда и на 6 в конце). Отклонения членов ряда $amcsw$ от линии суммарной компоненты trc_t соответствуют значениям случайной компоненты s_t .

Рис. 6. Ряд $амсв$ и суммарная компонента trc_t (2016–2020 гг.)

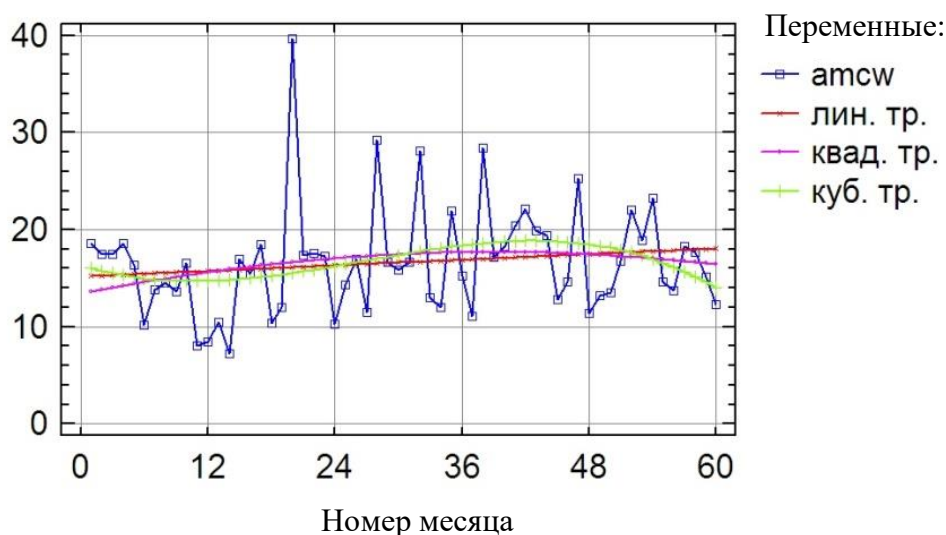
На втором этапе декомпозиции из суммарной компоненты trc_t вычтен тренд tr_t и выделена циклическая составляющая c_t ряда $амсв$:

$$c_t = trc_t - tr_t.$$

В качестве общей модели тренда, как и для ряда срочных значений $св$, принята полиномиальная кривая регрессии. Характер значений $амсв$ в ряду показывает (см. рис. 5), что для предварительного анализа этого сравнительно короткого ряда подходят модели трех первых порядков, т. е. линейная, квадратическая и кубическая (показаны на рис. 7 «на фоне» ряда $амсв$). Уравнения моделей:

$$\begin{aligned} tr_{\text{лин}} &= 15,1585 + 0,0483038n; \\ tr_{\text{ква}} &= 13,469 + 0,207113n - 0,0025658n^2; \\ tr_{\text{куб}} &= 16,4533 - 0,355744n + 0,0202418n^2 - 0,000248861n^3, \end{aligned}$$

где n – порядковый номер члена ряда (месяца).

Рис. 7. Ряд $амсв$ и три тренда: линейный, квадратический и кубический (2016–2020 гг.)

Все три линии трендов близки друг к другу. Линейный тренд характеризует поведение величины $atcsw$ как медленный рост. Квадратический тренд предполагает, что в конце третьего года наблюдений медленный рост сменяется медленным убыванием. Наконец, кубический тренд отличается существованием минимума (в конце первого года), точки перегиба (в конце второго года) и точки максимума (в середине третьего года). Абсолютные значения отклонений трендов второго и третьего порядка от линейного тренда невелики и, таким образом, следует полагать, что именно линейный тренд отражает основную (и важную!) черту поведения ряда $atcsw$ – медленный рост его значений в течение пяти лет наблюдений.

Сезонная компонента s_t , как и при анализе четырехлетнего ряда, моделировалась в предположении, что ее поведение связано с годовым ходом метеофакторов (прежде всего температур воздуха). Поэтому период p сезонных колебаний s_t принят равным 12 месяцам. Сезонная компонента моделировалась средними \hat{s}_i отклонениями значений sw от тренда (месячными индексами), т. е. положено [3], что

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

где $m + 1 = 5$ – число (годовых) периодов в ряду наблюдений.

По этой же методике были рассчитаны сезонные (месячные) индексы среднесуточных температур воздуха t .

Годовой ход сезонных компонент $atcsw$ и t (месячные индексы) показаны на рис. 8. В течение года локальные минимумы $atcsw$ (в третьем, седьмом и девятом месяцах) чередуются с локальными максимумами (во втором, четвертом, восьмом и одиннадцатом месяцах). Глобальный максимум соответствует восьмому месяцу года (августу), а глобальный минимум – двенадцатому (декабрю). Максимум температурных индексов соответствует седьмому месяцу (сентябрю). Можно считать, что внутригодовая динамика удельной электропроводности сходна с поведением температур воздуха. Сезонные индексы температур воздуха ожидаемым образом монотонно возрастают от января к июлю, а затем монотонно убывают к концу года (рис. 8).

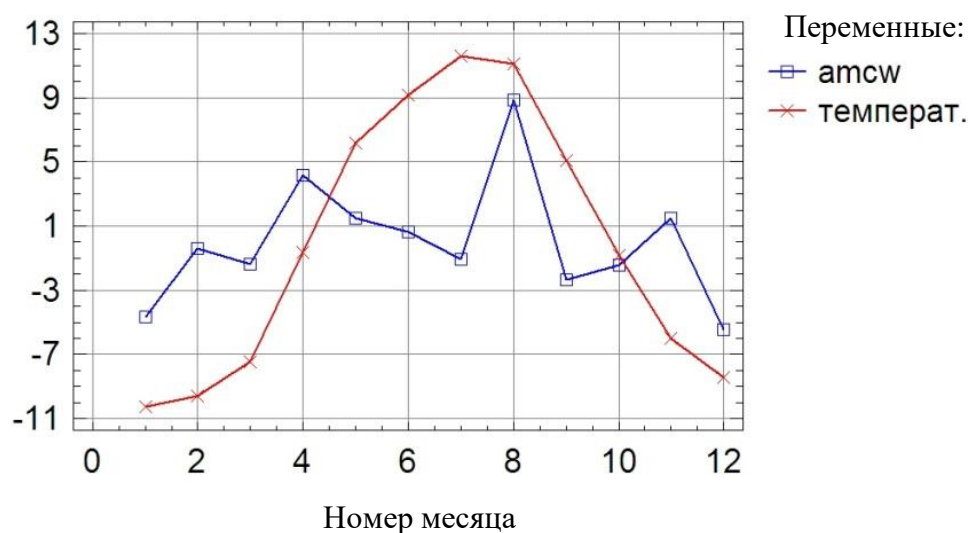


Рис. 8. Сезонные индексы ряда $atcsw$ и температуры воздуха (2016–2020 гг.)

Приведенные сравнения коэффициентов корреляции срочных значений обсуждаемых величин с коэффициентами корреляции среднемесячных значений этих величин показывают, что теснота связи между среднемесячными значениями везде больше, чем между срочными значениями. Можно объяснить это снижением влияния случайных колебаний в результате осреднения срочных значений.

Случайная компонента пятилетнего ряда $amcw$ (показана на рис. 9) моделировалась так же, как и для четырехлетнего ряда [2], т. е. комбинированным случайным процессом авторегрессии-скользящего среднего ARMA(p, q) [3]:

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

где параметры p и q задают порядок процесса; ε_t – процесс белого шума (среднее $M\varepsilon_t = 0$, дисперсия $D\varepsilon_t = 0$); φ , θ – параметры (коэффициенты) процессов авторегрессии и скользящего среднего соответственно.

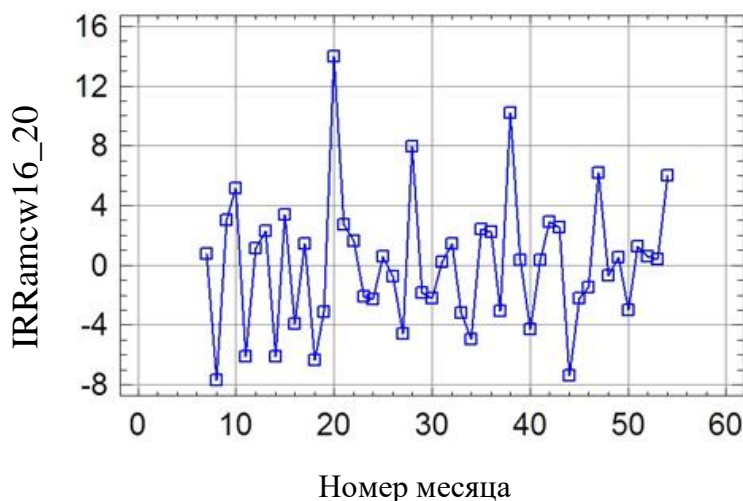


Рис. 9. Случайная компонента ряда $amcw$ (2016–2020 гг.)

Значения параметров порядка случайного процесса в результате удлинения ряда наблюдений на год не изменились, т. е. $p = 4$ и $q = 3$.

Примененная статистическая модель удельной электропроводности $amcw$ по мере накопления данных и удлинения ряда может изменять значения своих параметров, однако она представляется устойчивой и пригодной для прогнозирования динамики sw , а также для изучения связей электропроводности с метеофакторами.

ВЫВОДЫ

Построенная в 2019 г. аддитивная статистическая модель (четырёхлетнего) ряда удельной электропроводности осадков, выпавших в Твери в 2016–2019 гг., подтвердила свою пригодность для анализа данных, полученных в течение пятилетних наблюдений (2016–2020 гг.), и будет полезной для более длинных рядов наблюдений.

Установлены корреляционные связи срочных и среднемесячных значений удельной электропроводности осадков, выпадавших в Твери в 2016–2020 гг., с соответствующими значениями показателя кислотности pH , суточного количества осадков, температуры воздуха.

Наиболее тесная положительная связь существует между среднемесячными значениями удельной электропроводности и среднемесячными значениями показателя кислотности pH . Коэффициент корреляции связи составляет 0,272486 (на доверительном уровне 95 %). Это означает, что чем меньше кислотность атмосферных осадков, тем больше их электропроводность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Качановский Ф.В. Электропроводность осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2019. № 3 (3). С. 65–71.
2. Качановский Ф.В. Удельная электропроводность осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2020. № 4 (8). С. 89–97.
3. 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. Анализ особенностей электропроводности осадков, выпавших в Твери в 2016–2020 гг. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 2 (10). С. 47–56.

ANALYSIS OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE PRECIPITATION IN TVER DURING 2016–2020 YEARS

F.V. Kachanovsky

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Analysis had made of the precipitation's electrical conductivity (atmospheric precipitation had fallen in Tver in 2016–2020 years). Time series models of the electrical conductivity were examined. Linear model has considered as adequate.

Keywords: conductivity, acidity, acid rain, precipitation, model, time series, trend, cycle component, seasonal component, residuals.

REFERENCES

1. Kachanovsky F.V. Electrical conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya «Stroitelstvo. Elektrotehnika I Himicheskie Tekhnologii»*. 2019. No. 3 (3), pp. 65–71. (In Russian).
2. Kachanovsky F.V. Electrical specific conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Seriya «Stroitelstvo. Elektrotehnika I Himicheskie Tekhnologii»*. 2020. No. 4 (8), pp. 89–97. (In Russian).

3. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. Statisticheskij analiz dannyh na komp'yutere [Statistical analysis of data on a computer]. Moscow: INFRA-M, 1998. 528 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. Analysis of the electrical conductivity of the precipitation in Tver during 2016–2020 years // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 2 (10), pp. 47–56.

УДК 621.316:005.334

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ И НАДЕЖНОСТЬЮ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

К.Б. Корнеев, Ю.М. Павлова, Р. Осей-Овусу

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Корнеев К.Б., Павлова Ю.М.,
Осей-Овусу Р., 2021

Аннотация. Отмечено, что функционирование развивающихся электрических сетей с распределенной генерацией и управлением спросом требует совершенствования подходов к управлению надежностью системы. Сделан вывод, что оценка рисков и эффективное планирование могут осуществляться только на основе высококачественного системного анализа существующей инфраструктуры, учета всех факторов. Рассмотрены некоторые риски (в первую очередь связанные с информационной безопасностью), которые требуют всестороннего исследования в целях недопущения возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: энергосистема, риски, надежность, «Интернет вещей», безопасность, управление, распределенная генерация, управление спросом, альтернативная энергетика.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-56-67

В настоящее время развитая электроэнергетическая система вынуждена обрабатывать растущее количество «субсекундных» событий, которые требуют времени отклика, слишком короткого для того, чтобы операторы системы (диспетчеры) могли отреагировать на них. Одной из современных тенденций, делающих «умные» сети необходимыми, является распространение «умных» устройств. При этом каждый элемент «умной» сети может быть подвержен микроскопическим сбоям частоты, что создает

новую проблему для системных операторов. Многие бытовые электронные устройства (например, мобильные телефоны, решения для домашней автоматизации на основе Wi-Fi и интеллектуальные развлекательные устройства) представляют собой конечные точки, которые могут влиять на работоспособность системы. Кроме того, устройства «Интернета вещей» (IoT) работают на микросекундных тактовых частотах. Эти устройства являются новым источником изменчивости нагрузки и информационных потоков на скоростях, намного превышающих те, которые традиционно используют в электрических сетях. Решение должно заключаться в использовании защитных реле и синхронизирующих устройств, работающих более или менее автономно в реальном времени. Перспективные решения для строящихся и реконструируемых сетей должны предусматривать процесс их функционирования. Отметим, что оцифровка сетевых операций на глубину менее секунды создает новые уязвимости в киберпространстве [1–3].

К сожалению, на данный момент технологический рост и внедрение новых автоматизированных систем значительно опережают развитие нормативной базы, регулирующей аспекты интеграции этих технологий в существующую инфраструктуру. Это приводит к тому, что технологические разработки проходят «обкатку на месте», при этом их функционирование далеко не всегда согласуется с действующими стандартами. Существует также явная проблема частичной или полной несовместимости конечных устройств разных производителей в плане информационного обмена [4].

С помощью современных систем управления сетью в настоящее время обрабатывают, определяют и контролируют огромное количество конечных устройств. Широкое распространение распределенной генерации и управление спросом на электроэнергию подразумевают, что будущим системам управления сетью, возможно, придется координировать миллионы устройств управления конечными точками для поддержания нормального функционирования сети. Эти устройства различают по типу: цифровые датчики и интеллектуальные платы, встроенные в трансформаторы; мобильные устройства, используемые полевыми операторами и менеджерами для управления сетями, и т. д.

Существующие системы управления сетью не структурированы для крупномасштабной оптимизации миллионов устройств и не оборудованы для обработки все возрастающих объемов и типов данных. Конечные пользователи (потребители, а также группы потребителей с разными профилями спроса на электроэнергию) могут захотеть осуществить оптимальное локальное управление для удовлетворения своих потребностей, которые могут вступать в конфликт с оптимальным общесистемным контролем [5].

Системы управления сетью должны превратиться из централизованных в гибридные (центральных и распределенных платформ управления). Потребность в гибких сетевых операциях ставит под сомнение базовые предположения об управлении сетью, что предполагает изменение стандартов и операционных протоколов. Операции с большими энергосистемами входят в компетенцию регулирующих органов, таких как Министерство энергетики, но пока что имеется проблема информационного характера (в плане безопасности и надежности информационной составляющей сети), которая не может быть решена по причине значительной взаимосвязи с другими инстанциями, регламентирующими и регулируемыми функции информационного обмена в общедоступных и закрытых сетях передачи данных.

К сожалению, в России стали утверждать стандарты, регулирующие «Интернет вещей» [6], на 5 лет позже, чем в США и других странах: 15 ноября 2016 года

Министерство внутренней безопасности США разработало стратегические принципы [7], направленные на сокращение числа уязвимостей, порождаемых «Интернетом вещей», с помощью признанных передовых методов обеспечения безопасности. Эти принципы призваны служить руководством для заинтересованных сторон в их стремлении избежать проблем безопасности «Интернета вещей». Суть состоит в следующем:

1. Обеспечение безопасности на этапе проектирования сокращает потенциальные сбои и позволяет избежать сложных и дорогостоящих попыток сделать продукты после их разработки и внедрения безопасными.

2. Обязательны обновления безопасности и управление уязвимостями: уязвимости могут быть обнаружены в продуктах уже после их развертывания. Эти недостатки можно и нужно устранять с помощью исправлений, обновлений безопасности и стратегий управления уязвимостями.

3. Необходимо основываться на проверенных методах обеспечения безопасности. Многие из них, используемые в традиционных информационных технологиях и сетевой безопасности, могут быть применены к IoT: они также помогают выявлять уязвимости, обнаруживать нарушения, реагировать на потенциальные инциденты и восстанавливаться после повреждения или сбоя в работе устройств IoT.

4. Требуется расставлять приоритеты для обеспечения мер безопасности в соответствии с потенциальным воздействием: модели рисков существенно различаются в экосистеме «Интернета вещей», поэтому последствия сбоя безопасности для разных клиентов также будут значительно различаться. Таким образом, сосредоточение внимания на потенциальных последствиях сбоев, взлома или злонамеренных действий для всего спектра потребителей имеет решающее значение при определении того, на что следует направить конкретные усилия по обеспечению безопасности и кто лучше всего сможет смягчить серьезные последствия возникших сбоев в функционировании электросетевого комплекса.

5. Большая прозрачность «Интернета вещей» означает, что повышение уровня осведомленности может помочь производителям и промышленным потребителям определить, где и как применить меры безопасности, обеспечить избыточность; производители и промышленные потребители будут лучше подготовлены для надлежащей минимизации угроз и уязвимостей, станут осуществлять ее как можно быстрее.

6. Подключаться требуется осторожно и осознанно. Иными словами, потребители «Интернета вещей» могут также помочь в устранении потенциальных угроз, создаваемых подключением к сети, благодаря тому, что будут подключаться осторожно и намеренно и взвешивать риски потенциального взлома или отказа устройства «Интернета вещей» с затратами на ограничение подключения конечных устройств к интернету.

Следует отметить, что даже издание нормативных и регламентирующих документов зачастую не приводит к существенным сдвигам в обеспечении кибербезопасности объектов энергетики. Ярким примером являются попытки взлома энергетических объектов по всему миру [8–10]. При этом некоторые из этих попыток могут оказаться успешными и их не обнаруживают на протяжении достаточно большого количества времени [11].

Технология управления спросом дает потребителям возможность изменить обычные модели потребления электроэнергии и выступает, таким образом, гибким сетевым ресурсом, способным повысить надежность системы, снизить рыночные цены на электроэнергию, а также потребность в капитальных вложениях для удовлетворения

пикового спроса. Эта технология также может использоваться для минимизации нагрузки и формирования прироста нагрузки, а также для того, чтобы помочь сетям уменьшить изменчивость генерации.

Существует множество программ аварийного восстановления. Некоторые из них предлагаются непосредственно энергетическими компаниями или же операторами электросетей. Таким образом, внедрение управления спросом изменяет привычные понятия «разрешенная мощность» и «установленная мощность», так как каждая из этих величин в рамках реализации технологии может быть вариативной. Однако в плане тарифообразования и определения технологических норм для подключения к существующей электрической инфраструктуре (подстанциям и линиям электропередач) реализация такого подхода приводит к возникновению существенных рисков, связанных с неопределенностью. Тем не менее благодаря внедрению согласованного управления на базе распределенной генерации, систем интеллектуального управления потоками мощности, большей автоматизации производственных процессов с минимальной зависимостью от человеческого фактора станет возможным значительно сместить потребительский спрос с пиковых периодов на непииковые.

Имеются серьезные проблемы, которые мешают сделать ресурсы аварийного восстановления надежными, предсказуемыми и устойчивыми, что могло бы способствовать их функционированию в роли резервного генератора. Для создания надежных, предсказуемых и устойчивых ресурсов нужны развитая система учета, наличие фактических возможностей у энергосистемы динамически управлять (не в одностороннем порядке отключать, а согласованно уменьшать расход электроэнергии) работой потребителей. До тех пор, пока не будут приняты единые стандарты, обеспечивающие точность и достоверность данных, получаемых операторами электросетей, сведения о мощности аварийного восстановления не будут учитываться операторами сети: предполагаемый ресурс аварийного восстановления мощностью 100 МВт, который теоретически может быть введен, не означает, что 100 МВт мощности потребителей будут быстро выведены из электрической сети. Существующий нормативный документ [12] предусматривает некоторые меры, улучшающие ситуацию, однако из-за низкой автоматизации и значительной потребности в согласованиях всех этапов процесс координирования мощностей является долгим (может занимать несколько часов), что нивелирует всю концепцию динамического управления (т. е. реагирования в течение секунд или нескольких минут).

Топографический и географический факторы могут оказывать дополнительное и очень важное влияние на возможность решения основных задач управления энергосистемой. Так, информационно-коммуникационные технологии (ИКТ) работают гораздо менее эффективно в гористой местности или городской инфраструктуре, так как не удается обеспечить надежность и необходимую скорость передачи беспроводного сигнала. Разработчикам интеллектуальных сетей приходится создавать избыточность, чтобы справиться с определенной топографической асимметрией (используют при этом несколько информационных каналов). Кроме того, переход на новые беспроводные стандарты (5G, WiFi) и одновременно повышение скорости передачи данных, уменьшение задержек сигнала снижают дальность передачи сигнала, что может отрицательно сказаться на функционировании сетей, а также увеличить капитальные затраты на информационную инфраструктуру. В данном случае отказ от перехода на современные стандарты не является выходом. Объясняется это также и тем, что в ряде существующих стандартов

связи выявлены неустранимые критические уязвимости, которые могут быть использованы для неавторизованного доступа и вмешательства в функционирование работы электрических сетей, что недопустимо.

Внедрение технологии распределенной генерации может привести в определенных городах к значительным нагрузкам на местную инфраструктуру, в том числе на трансформаторы и подстанции, что может породить серьезные проблемы для местных энергокомпаний. Особенно важным этот фактор становится, если элементы распределенной генерации и группы потребителей образуют своеобразные кластеры. В данном случае системные операторы должны будут более детально следить за состоянием сети, а изменения топологии сети для смягчения эффектов кластеризации станут важными путями адаптации сети к влиянию потребителя на нее и ее работу. Поскольку поведение потребителей может резко меняться, новые процессы проектирования сетей должны работать быстрее (начиная от процессов базовой архитектуры и заканчивая процессами, происходящими при фактическом развертывании) [13]. Регулирующие органы обязаны мгновенно учитывать дополнительные системные затраты, которые вызваны операторами сетей, предугадывающими проблемы и принимающими меры для их смягчения до того, как возникшие сбои приведут к отключениям сети.

Таким образом, надежность становится двусторонним процессом: в нем оказываются задействованы и операторы сети, и потребители. Надежность сети, предполагающая обеспечение долгого времени безотказной работы системы, теперь обуславливается «надежностью потребителей». Ранее понятие «надежность электроснабжения» обычно было синонимично понятию «надежность сети» (или «надежность системы»). Надежность потребителей формируется инициативами, реализуемыми на протяжении последних десятилетий. Эти инициативы направлены на постоянное повышение энергоэффективности, внедрение распределенной генерации, интеграцию «Интернета вещей», а также смещение приоритета потребителей (особенно коммерческого сектора) на услуги бесперебойного питания. Растущая взаимозависимость между операторами сети и потребителями – двусторонний поток информации и мощности – означает, что надежность сети может повыситься только в случае, если произойдет интеграция действий потребителей в работу сети.

Сегодня многие категории потребителей так или иначе взаимодействуют с электросетями. У клиентов есть инструменты для изменения своих моделей потребления в ответ на ценовые сигналы (дифференцированные по времени и зонам тарифы), а также на запросы от сетевых операторов. Иными словами, произошло существенное изменение потребителя: из фигуры с пассивной нагрузкой он стал клиентом, который активно участвует в управлении спросом. В течение 10–15 лет многие новые устройства, которые, вероятно, станут частью нашей электроэнергетической системы (включая большие электростанции и собственные мощности малой энергетики, домашние накопители энергии и динамично управляемые светильники в составе уличного освещения, трансформаторы и электромобили), также будут иметь цифровую связь с сетью. Большинство этих устройств смогут «видеть» другие элементы в общей сети и динамически менять правила своего поведения. Двухнаправленный обмен информацией с потребителями может привести либо к активному участию последних в сетевых операциях на многих уровнях (например, клиенты смогут реагировать на сигналы времени использования или цены в реальном времени), либо к пассивному, т. е. с помощью устройств, предназначенных для отображения информации о потребителях, которые

реагируют на изменения тарифов и оперативные сигналы. Прозрачность и одновременно защищенность этой связи являются ключевыми факторами работы и управления энергосистемой, имеют большое значение в плане надежности как для клиентов, так и для системы в целом.

Реакция потребителей на сигналы от энергосистемы может быть более точной, своевременной и предсказуемой благодаря улучшенным средствам обеспечения ИКТ и лучшей аналитике на стороне сети, ориентированной на управление общей надежностью системы, а не только на выравнивание графиков нагрузки. Например, имеется потенциальная возможность использования батарей электромобилей для формирования запасного актива мощности. Однако такое использование батарей потребует переоборудования зарядных станций с установкой в них инвертеров, а также изменения всей нормативной базы, поскольку хозяин электромобиля становится полноправным участником энергорынка и должен оплачивать отпущенную ему электроэнергию [14].

Чтобы увеличить степень участия потребителей в управлении спросом, в некоторых странах значительно развили распределенную генерацию (например, появились солнечные батареи на крыше или ветряки во дворе), позволяющую потребителям производить электроэнергию, которую они затем продают и отправят в сеть. В результате электричество и информация должны передаваться в двух направлениях через распределительную сеть, что реализуется посредством интеллектуальных счетчиков и облачных технологий. Это двустороннее взаимодействие становится все более сложным, поскольку распределенная генерация продолжает проникать в промышленные, коммерческие и жилые сегменты услуг электроснабжения. Тем не менее во многих странах установка собственных систем генерации в небольших домохозяйствах и появление устройств выработки электроэнергии в промышленных масштабах являются дотационными [15]. Из-за высоких тарифов, учитывающих необходимость окупаемости этих систем, возникает так называемая энергетическая бедность, когда свыше 10 % дохода тратится на оплату электрической энергии [16].

Оценить реальную степень проникновения распределенной зеленой генерации, т. е. не вызывающей в процессе работы выбросов парниковых газов (в первую очередь CO_2), оказывается достаточно сложно. Как правило, указывается суммарная максимальная мощность всех установок за все годы (что, конечно, далеко от количества фактически используемых установок, а также не учитывает выход некоторых из них из строя вследствие износа, поломок и т. п.). Кроме того, учет в зеленой энергетике работы гидроэлектростанций и тепловых электростанций на газе от переработки биомассы приводит к тому, что в обществе понятия «альтернативная энергетика» (энергия ветра и солнца) и «зеленая энергетика» (энергия солнца, ветра, биомассы и воды) становятся синонимами, а смешение понятий порождает завышенные показатели эффективности работы. Наконец, в публикациях можно встретить заявления о том, что более 50 % энергии страны было получено от солнечных батарей [17], однако не упоминается или упоминается вскользь, что погода в дни максимальной выработки была крайне благоприятной для функционирования батарей, т. е. солнечной, сухой, и что показатель энергопотребления в стране очень низок, так как доля возобновляемой энергии в общем энергопотреблении применительно к облачному дню с максимальной нагрузкой составит около 15–20 %.

Распространение распределенной генерации и улучшение управлением спросом приведут к тому, что энергосистеме для повышения надежности сети потребуются

усовершенствованные распределительные цепи и подстанции, которые будут допускать двусторонние перетоки электроэнергии, новые схемы защиты и новые парадигмы управления. Существующие и разрабатываемые технологии силовой электроники (интеллектуальные инверторы и интеллектуальные хранилища энергии) в сочетании с ИКТ могут предоставить операторам сетей гибкость, необходимую для управления смешанным набором распределенных генераторов.

В настоящее время поддержание и повышение общей надежности энергосистемы не являются поводом для инвестирования и редко попадают в сферу интересов клиентов. В случаях, когда частью уравнения являются элементы распределенной генерации, действия клиентов могут увеличивать риски, связанные с обеспечением надежности энергосистемы. Кроме того, существующие энергосистемы изначально разрабатывались для передачи электроэнергии в одном направлении – от источников к потребителям. Появление обратного направления потоков мощности потребует значительных изменений в аппаратном парке, в устройствах релейной защиты и автоматики, а также в реализации учета отпущенной и полученной электроэнергии.

Как уже отмечалось ранее, для полноценного поддержания надежности сети требуется централизованное управление. Однако концентрация управления в одних руках (или у одного оператора электросети) и повышенная взаимосвязь энергопроизводящих и энергопотребляющих объектов одновременно способствуют успешности злонамеренных атак на элементы такой сети. Использование общедоступных сетей передачи данных приводит к тому, что эти сети выступают средством кибератаки. Последствия подобных атак могут распространяться не только на составные части электросети, но и на устройства клиентов, которые являются частью «Интернета вещей». Иными словами, существуют значительные пробелы в методической и технической части на стыке электричества и информации, которые требуют новых подходов, позволяющих защитить критически важную инфраструктуру от упомянутых выше атак.

Риски, связанные с надежностью функционирования электросетей, – это сложное сочетание природных и человеческих угроз. Снижение рисков включает в себя разработку будущих проектов сетей, обеспечивающих максимальную гибкость, а также инвестиции в структурные, технические и технологические решения, которые повышают устойчивость сети и сокращают количество аварийных отключений. Некоторые стратегии могут помочь минимизировать риски различных угроз, в то время как другие стратегии могут привести к росту этих угроз. Среди мер минимизации рисков называют усиление элементов (например, защиту от ветра и наводнений); модернизацию (например, инвестиции в датчики, автоматизированные средства управления, базы данных и инструменты); общую готовность (например, техническое обслуживание оборудования, расчистку просек, создание резерва критически важного оборудования); совершенствование аналитики и безопасности в целом.

Владельцы и операторы сетей должны управлять рисками, связанными с широким спектром угроз. Эти угрозы определяют как все, что может нарушить работу системы или повлиять на нее (природные, экологические, человеческие или другие факторы). Многие угрозы для критически важной инфраструктуры электроснабжения являются универсальными (например, физические атаки), в то время как другие возникают в зависимости от географического положения и времени года (например, стихийные бедствия). Угрозы также различают по частоте возникновения: очень вероятные (например, погодные явления); менее вероятные (например, электромагнитный импульс).

Электроэнергетические компании обычно готовы к чрезвычайным ситуациям. Однако опасности, которые развиваются с течением времени, или комбинации опасностей, которые возникают одновременно, требуют усиленных или новых мер для предотвращения или смягчения. Например, аварийная ситуация на АЭС «Фукусима-1», возникшая из-за одновременного воздействия цунами и обесточивания собственных нужд после землетрясения, казалась чрезвычайно маловероятной, хотя к независимому воздействию каждого из этих факторов атомная электростанция была готова.

Понимание различных рисков для электроэнергетической системы, которое предполагает также характеристику исторических тенденций и прогнозирование, в том числе различных угроз, крайне важно для смягчения угроз и повышения устойчивости. Можно заметить, что многие эксперты в области энергетики оценивают состояние управления рисками в энергетике РФ как не очень высокое. При этом они ожидают, что многие риски усугубятся в будущем, следовательно, необходимы новые стратегии управления рисками. Текущие методы хорошо подходят для устранения общих угроз большинству компонентов системы, однако не всегда работают в отношении возникающих угроз, о которых имеется ограниченный объем данных и опыта. В энергетическом секторе существует множество хорошо зарекомендовавших себя методов управления рисками, порождаемыми различными текущими угрозами, но практики для других типов угроз только появляются, что вызывает необходимость в их дальнейшей разработке, развитии, совершенствовании и рассмотрении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bailey T., Maruyama A., Wallance D. The energy-sector threat: How to address cybersecurity vulnerabilities // *McKinsey & Company*. 2020. November. URL: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Risk/Our%20Insights/The%20energy%20sector%20threat%20How%20to%20address%20cybersecurity%20vulnerabilities/The-energy-sector-threat-How-to-address-cybersecurity-vulnerabilities-F.pdf> (date of access: 22.02.2021).
2. Cyber security in the energy sector. Recommendations for the European commission on a european strategic framework and potential future legislative acts for the energy sector // *EECSP Report*. February 2017. URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/eecsp_report_final.pdf (date of access: 22.02.2021).
3. Корнеев К.Б., Окунева В.В., Павлова Ю.М. Открытость и защищенность протоколов передачи критической информации на объектах энергетики // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2019. № 2 (2). С. 50–57.
4. Корнеев К.Б., Окунева В.В., Ковалева Ю.В. Моделирование цифровой автоматизации подстанций для защиты межподстанционных линий // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 50–57.
5. Herrera L.Á., Rosellón J. On distributive effects of optimal regulation for power grid expansion // *Energy Policy*. 2014. Vol. 69, pp. 189–204. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.02.011
6. ГОСТ Р ИСО/МЭК 29161-2019. Информационные технологии. Структура данных. Уникальная идентификация для «Интернета вещей». М.: Стандартинформ, 2019.
7. Strategic principles for securing the Internet of things (IoT) Version 1.0 (Washington, DC: DHS, November 15, 2016). URL: https://www.dhs.gov/sites/default/files/publications/Strategic_

- Principles_for_Securing_the_Internet_of_Things-2016-1115-FINAL....pdf (date of access: 22.02.2021).
8. Greenberg A. The highly dangerous «Triton» hackers have probed the US grid // *Wired*. 2019. June, 14. URL: <https://www.wired.com/story/triton-hackers-scan-us-power-grid/> (date of access: 22.02.2021).
9. Vasquez C. Huge federal hack ripples across energy industry // *E&E News*. 2020. December 17. URL: <https://www.eenews.net/stories/1063720933> (date of access: 22.02.2021).
10. «Интернет вещей» в электроэнергетике России // *PricewaterhouseCoopers*. 2018. Март. URL: https://www.pwc.ru/ru/iot/Stapran_D_IoT_in_energy.pdf (date of access: 22.02.2021).
11. Undetected hacks of IoT devices may be straining our power system & strangling our economy // *Meemoori Research*. 2018. May 28. URL: <https://meemoori.com/undetected-hacks-iot-devices-may-straining-power-system-strangling-economy/> (date of access: 22.02.2021).
12. Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики»: приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 12.07.2018 № 548. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71924756/> (дата обращения: 22.02.2021).
13. Окунева В.В., Агамирзоев А.А., Корнеев К.Б. Реализация распределенной генерации посредством создания виртуальных электростанций // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 3 (7). С. 51–59. DOI: 10.46573/2658-7459-2020-3-51-59
14. Тычинин А. Как заработать с помощью электромобиля Nissan, не проехав ни единого лишнего километра? // *Авторевю*. № 11 (589). С. 26–28.
15. Кинкарц С., Евдокимова О. В Германии спорят о господотациях на развитие альтернативной энергетики. URL: <https://www.dw.com/ru/в-германии-спорят-о-господотациях-на-развитие-альтернативной-энергетики/a-14844622> (дата обращения: 22.02.2021).
16. Tverberg G. How renewable energy models can produce misleading indications // *Our Finite World*. 2019. October 24. URL: <https://ourfinitemworld.com/2019/10/24/how-renewable-energy-models-can-produce-misleading-indications/comment-page-9/> (date of access: 22.02.2021).
17. German solar breaks three records within two weeks // *Germany Trade and Invest*. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/german-solar-breaks-three-records-within-two-weeks-263664861.html> (date of access: 22.02.2021).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Корнеев К.Б., Павлова Ю.М., Осеи-Овусу Р. Управление рисками и надежностью в системах электроснабжения // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 2 (10). С. 56–67.

RISK AND RELIABILITY MANAGEMENT IN POWER SUPPLY SYSTEMS

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

Abstract. It is noted that the functioning of developing electric networks with distributed generation and demand management requires improving approaches to managing the reliability of the system. It is concluded that risk assessment and effective planning can be based only on a high-quality system analysis of the existing infrastructure, taking into account all factors. Some risks (primarily related to information security) that require a comprehensive study in order to prevent the occurrence of emergency situations are considered.

Keywords: power system, risks, reliability, Internet of Things (IoT), security, management, distributed generation, demand management, alternative energy.

REFERENCES

1. Bailey T., Maruyama A., Wallance D. The energy-sector threat: How to address cybersecurity vulnerabilities. *McKinsey & Company*. 2020. November. URL: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Business%20Functions/Risk/Our%20Insights/The%20energy%20sector%20threat%20How%20to%20address%20cybersecurity%20vulnerabilities/The-energy-sector-threat-How-to-address-cybersecurity-vulnerabilities-F.pdf> (date of access: 22.02.2021).
2. Cyber security in the energy sector. Recommendations for the European commission on a european strategic framework and potential future legislative acts for the energy sector. *EECSP Report*. February 2017. URL: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/eecsp_report_final.pdf (date of access: 22.02.2021).
3. Korneev K.B., Okuneva V.V., Pavlova Yu.M. Openness and security of protocols for the transfer of critical information at energy facilities. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitelstvo. Elektrotehnika I Himicheskie Tekhnologii»*. 2019. No. 2 (2), pp. 50–57. (In Russian).
4. Korneev L.B., Okuneva V.V., Kovalyova Yu.V. Simulation of digital substation automation to protect inter-substation lines. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitelstvo. Elektrotehnika I himicheskie tekhnologii»*. 2021. No. 1 (9), pp. 50–57. (In Russian).
5. Herrera L.A., Rosellón J. On distributive effects of optimal regulation for power grid expansion. *Energy Policy*. 2014. Vol. 69, pp. 189–204. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.02.011
6. GOST R ISO/IEC 29161-2019. Informacionnie tekhnologii. Struktura dannyh. Unikalnaya identifikaciya dlya interneta veschey [Information technology. Data structure. Unique identification for the Internet of Things]. Moscow: Standartinform, 2019. (In Russian).

7. Strategic principles for securing the internet of things (IoT) Version 1.0 (Washington, DC: DHS, November 15, 2016). URL: https://www.dhs.gov/sites/default/files/publications/Strategic_Principles_for_Securing_the_Internet_of_Things-2016-1115-FINAL....pdf (date of access: 22.02.2021).
8. Greenberg A. The highly dangerous «Triton» hackers have probed the US grid. *Wired*. 2019. June 14. URL: <https://www.wired.com/story/triton-hackers-scan-us-power-grid/> (date of access: 22.02.2021).
9. Vasquez C. Huge federal hack ripples across energy industry. *E&E News*. 2020. December 17. URL: <https://www.eenews.net/stories/1063720933> (date of access: 22.02.2021).
10. Internet of things in Russian electricity. *PricewaterhouseCoopers*. 2018. March. URL: https://www.pwc.ru/ru/iot/Stapran_D_IoT_in_energy.pdf (date of access: 22.02.2021). (In Russian).
11. Undetected hacks of IoT devices may be straining our power system & strangling our economy. *Meemoori Research*. 2018. May 28. URL: <https://meemori.com/undetected-hacks-iot-devices-may-straining-power-system-strangling-economy/> (date of access: 22.02.2021).
12. Ob utverzhdenii trebovanij k obespecheniyu nadezhnosti elektroenergeticheskikh sistem, nadezhnosti i bezopasnosti ob'ektov elektroenergetiki i energoprinimayushchih ustanovok «Pravila predotvrashcheniya razvitiya i likvidacii narushenij normal'nogo rezhima elektricheskoy chasti energosistem i ob'ektov elektroenergetiki»: prikaz Ministerstva energetiki Rossijskoj Federacii ot 12.07.2018 № 548 [On approval of requirements for ensuring the reliability of electric power systems, reliability and safety of electric power facilities and power receiving installations «Rules for preventing the development and elimination of violations of the normal operation of the electrical part of power systems and electric power facilities»: order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of July 12, 2018 No. 548]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71924756/> (date of access: 22.02.2021). (In Russian).
13. Okuneva V.V., Agamirzoev A.A., Korneev K.B. Implementation of distributed generation by creating virtual power plants. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Stroitelstvo. Elektrotehnika I Himicheskie Tekhnologii»*. 2020. No. 3 (7), pp. 51–59. (In Russian). DOI: 10.46573/2658-7459-2020-3-51-59
14. Tychinin A. How to make money with a Nissan electric car without driving a single extra kilometer? *Autoreview*. No. 11 (589), pp. 26–28. (In Russian).
15. Kinkartz S., Evdokimova O.V. In Germany, they argue about state subsidies for the development of alternative energy. URL: <https://www.dw.com/ru/в-германии-спорят-о-госдотациях-на-развитие-альтернативной-энергетики/a-14844622> (date of access: 22.02.2021). (In Russian).
16. Tverberg G. How renewable energy models can produce misleading indications. *Our Finite World*. 2019. October 24. URL: <https://ourfinitemworld.com/2019/10/24/how-renewable-energy-models-can-produce-misleading-indications/comment-page-9/> (date of access: 22.02.2021).
17. German solar breaks three records within two weeks. *Germany Trade and Invest*. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/german-solar-breaks-three-records-within-two-weeks-263664861.html> (date of access: 22.02.2021).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

KORNEEV Konstantin Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: energy-tver@mail.ru

PAVLOVA Yulia Mikhailovna – Senior Lecturer, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

OSEI-OWUSU Raymond – Graduate Student, Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: orajmond2008@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Korneev K.B., Sokolova Yu.M., Osei-Ovusu R. Risk and reliability management in power supply systems // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 2 (10), pp. 56–67.

УДК 44.31.03:53.07.00:45.43.00

**ВЛИЯНИЕ ЗАДЫМЛЕННОСТИ АТМОСФЕРЫ И ВЫСОТЫ ШЛАКА
НА ТЕПЛООБМЕН В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ.
ЧАСТЬ I. ВЛИЯНИЕ ЗАДЫМЛЕННОСТИ АТМОСФЕРЫ
НА ПОТЕРИ С ГАЗАМИ И ВОДОЙ**

А.Н. Макаров

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Макаров А.Н., 2021

Аннотация. Состав пылегазовой атмосферы влияет на теплообмен в дуговой сталеплавильной печи. При значительной запыленности атмосферы печи тепловой поток дуг, излучаемый ими в свободное, не заполненное шихтой, пространство в основном поглощается пылегазовой средой и уносится из печи в виде тепловых потерь с отходящими газами. В лучепрозрачной атмосфере печи тепловой поток дуг, излучаемый ими в свободное пространство, достигает стен, поглощается водой водоохлаждаемых панелей и уносится из печи в виде тепловых потерь с охлаждающей водой.

Ключевые слова: электросталь, электрическая дуга, теплообмен, тепловое излучение, печь.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-67-77

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире, в частности в России, до 40 % стали производят в электросталеплавильных цехах (рис. 1) в дуговых сталеплавильных печах (ДСП). На протяжении долгого времени отсутствовала методика расчета теплообмена в ДСП. В конце XX – начале XXI вв. в Тверском государственном техническом университете была разработана теория теплообмена в ДСП [1]. Воспользуемся разработанными теорией и методикой расчета теплообмена в ДСП для анализа влияния состава пылегазовой атмосферы и высоты слоя шлака на теплообмен и удельный расход электроэнергии в ДСП. Электрические дуги являются основными источниками энергии в ДСП (рис. 2).



Рис. 1. Металлургическая китайская компания с электросталеплавильным цехом производительностью 6 млн т стали в год

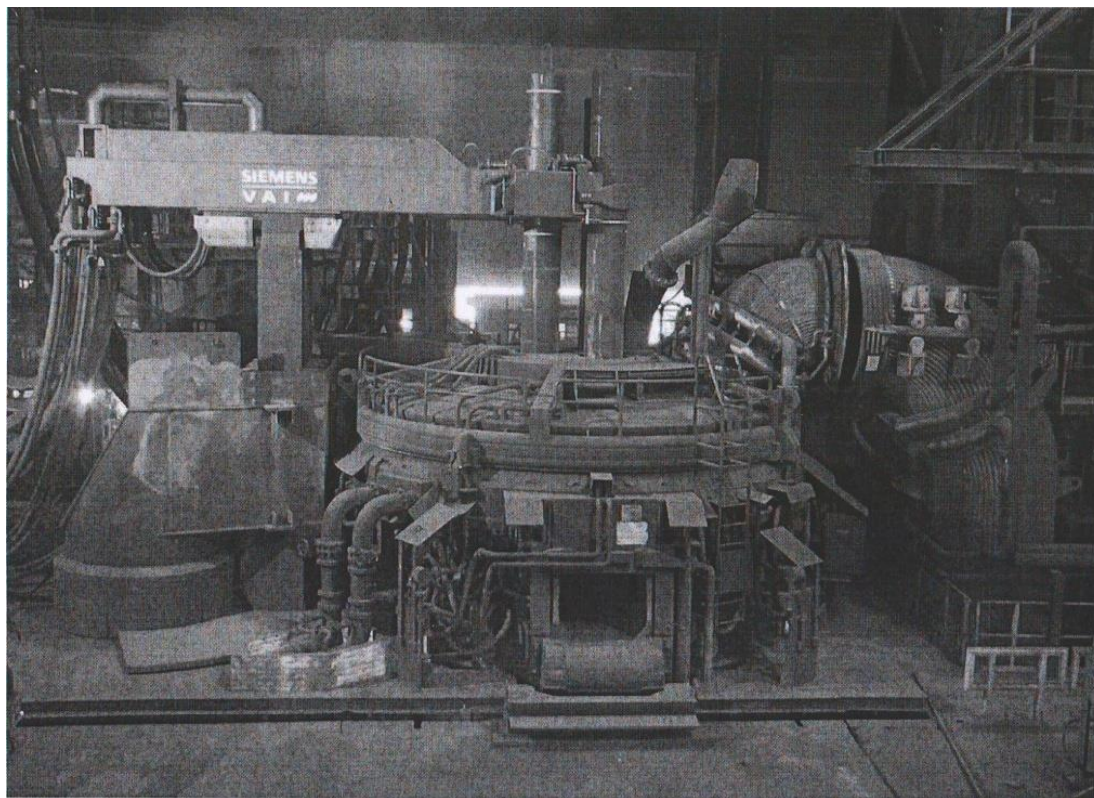


Рис. 2. Дуговая сталеплавильная печь фирмы Simens VAI

По данным энергетических балансов плавки стали в ДСП [2], на долю дуг приходится 55–65 % энергии, газокислородных горелок (ГКГ), экзотермических реакций окисления железа и других элементов шихты – 35–45 % энергии, поступающей в современную высокомоощную ДСП. Вся электрическая энергия в дугах ДСП преобразуется в тепловую. Согласно многочисленным экспериментальным исследованиям теплообмена, проведенным несколькими группами исследователей в течение 10 лет на ДСП всего ряда вместимостей (от 3 до 200 т), тепловой поток дуг ДСП на 92–96 % состоит из потока теплового излучения и на 4–8 % из конвективного потока и потока, передаваемого теплопроводностью [3–7]. В статье проведен анализ влияния высоты слоя шлака и задымленности атмосферы на теплообмен и удельный расход электроэнергии в современных высокомоощных ДСП: ДСП-100, ДСП-120, ДСП-150 вместимостью 100, 120, 150 т соответственно. Сравниваемые печи работают как на ломе, так и на металлизированных окатышах с загрузкой шихты загрузочными корзинами и загрузочным конвейером с подогревом шихты. В печах применяют все современные способы интенсификации процесса плавки стали: ГКГ, инжекторы угольного порошка, кислородные фурмы, автоматизированные системы управления производственным процессом. Перечисленные печи работают в одинаковых энергетических режимах и имеют следующие показатели [8, 9]: удельная мощность трансформатора 700–800 кВА/т; расход кислорода 20–30 м³/т, природного газа 5–10 м³/т, угля 5–15 кг/т; продолжительность плавки 45–60 мин; удельный расход электроэнергии 375–440 кВт·ч/т (при плавлении окатышей и лома удельный расход электроэнергии 530–550 кВт·ч/т).

ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ В ДСП С ОТХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ И ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДОЙ

Удельные потери с отходящими газами в печах ДСП-100–ДСП-150 изменяются от максимального значения (242 кВт·ч/т) в ДСП-120 Consteel с конвейерной загрузкой нагретой шихты отходящими газами, что составляет 31 % расходной части энергобаланса, до минимального (140 кВт·ч/т; 22 % расходной части энергобаланса) в ДСП-120 с загрузкой шихты корзинами. Большое пылегазообразование в печи ДСП-120 Consteel по сравнению с ДСП-120 обычной конструкции объясняется использованием в Consteel на 65 % большей массы коксового порошка для поддержания пенистого шлака в течение всей плавки и повышения КПД дуг до 0,60–0,73 [2]. Дуги в печах Consteel в течение всего времени плавки горят на ванну металла, и их постоянно необходимо экранировать шлаком для увеличения доли мощности теплового излучения дуг на ванну металла и шлак, уменьшения доли мощности теплового излучения дуг на стены и свод печи.

В печах ДСП-120 обычной конструкции определенную часть времени плавки наводить шлак не нужно, так как после завалки шихты и прорезки колодцев дуги горят в колодцах, экранированы колодцами и полезно излучают 93–80 % мощности на ванну металла и металлошихту в колодцах. КПД дуг в ДСП-120 в вышеописанный период составляет 0,93–0,80 [2]. Максимальному значению удельных потерь с отходящими газами (242 кВт·ч/т) в ДСП-120 Consteel соответствует минимальное значение потерь с охлаждающей водой в этих печах (48 кВт·ч/т), которое составляет 7 % расходной части энергобаланса. В энергобалансе ДСП-120 с загрузкой шихты корзинами минимальному значению удельных потерь с отходящими газами 140 кВт·ч/т соответствует максимальное значение потерь с охлаждающей водой (50–60 кВт·ч/т, или 8–9 % расходной части энергобаланса). Анализ энергетических балансов ДСП-100–ДСП-150 выявил зависимость:

чем больше расход кислорода и угольного порошка в процессе плавки, тем больше объем отходящих газов, тем больше тепловые потери с отходящими газами и тем меньше тепловые потери с охлаждающей водой. Печи работают в близких энергетических режимах и с близкой удельной мощностью дуг, вода используется для охлаждения панелей стен и свода печей.

Пылегазовая атмосфера печи представляет собой взвесь твердых и жидких частиц в газовой среде. Газовая среда ДСП включает в себя азот, оксиды и диоксиды азота, кислород, оксиды и диоксиды углерода. В газовой среде во взвешенном состоянии находится пыль, состоящая из Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , MnO . Запыленность газов ДСП зависит от периода плавки и изменяется от 5 до 50 г/м^3 [10], т. е. в 10 раз в процессе плавки. Максимального значения ($40\text{--}50 \text{ г/м}^3$) запыленность газов достигает в период продувки ванны кислородом или подачи в ДСП порошкообразного углерода. Размер частиц пыли – от 0,01 до 100 мкм [11]. Температура парогазовой смеси на выходе из печи изменяется по ходу плавки в широком диапазоне: от $300\text{--}600 \text{ }^\circ\text{C}$ в процессе расплавления шихты до $1500\text{--}1600 \text{ }^\circ\text{C}$ в период интенсивной продувки ванны кислородом. Плотность электросталеплавильной пыли составляет $0,9 \text{ т/м}^3$ [10].

При значительном изменении в процессе плавки запыленности пылегазовой смеси (от 5 до 50 г/м^3), размеров пыли от 0,01 до 100 мкм коэффициент поглощения пылегазовой атмосферы печи k изменяется в следующих пределах: $k = 0\text{--}1,4$ [1, 2]. В расчетах теплообмена в ДСП использовали коэффициент поглощения $k = 0,1$ для лучепрозрачной атмосферы печи и средний коэффициент поглощения $k_{\text{ср}} = 0,7$ для запыленной атмосферы печи. При этом удовлетворительно совпали экспериментальные и расчетные данные теплообмена в ДСП с водоохлаждаемыми сводом и стенами [1, 2]. При коэффициенте поглощения пылегазовой атмосферы печи, равном 0,7 с помощью расчетов и измерений получены близкие по величине (различие составляет лишь 10–20 %) тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен и свода [1].

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОТОКОВ ТЕПЛОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДУГ НА СТЕНЫ ДСП

Выясним влияние объема отходящих из печей газов и высоты слоя шлака на тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен и тепловые потоки с охлаждающей водой. Необходимые построения для расчетов, выполненные в масштабе в программах AutoCAD и Excel, даны на рис. 3.

Плотность потока теплового излучения дуги q , падающего на расчетную площадку, расположенную на стенах ДСП, определяли по выражению [1]

$$q = \frac{\alpha_{\text{ст}} P_{\text{д}} \cos \alpha \cos \beta l_{\text{отк}}}{\pi^2 r^2 l_{\text{д}}} \cdot e^{-kr},$$

где $\alpha_{\text{ст}}$ – доля мощности дуги, выделяющаяся в столбе дуги, определяется по методике, изложенной в работе [1]; $P_{\text{д}}$ – мощность дуги, кВт; k – коэффициент поглощения газовой атмосферы печи (изменяется в ДСП в пределах от 0,1 до 1,4) [1].

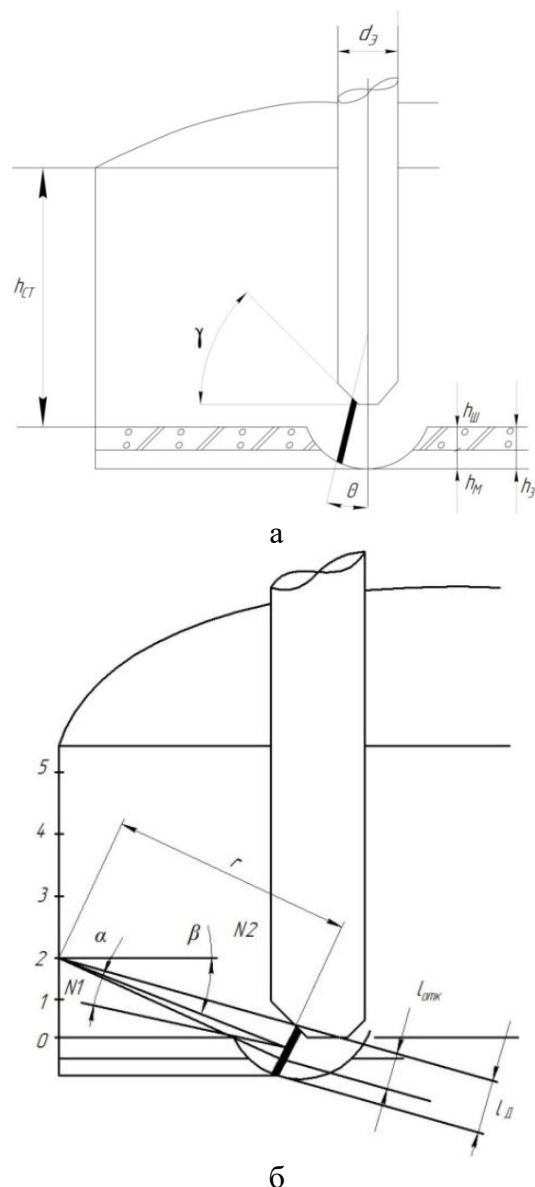


Рис. 3. Схемы взаиморасположения: а – дуги, шлака, стен;

б – для расчета потоков тепловых излучений дуг на стены; $h_{ст}$ – высота стен ДСП, м; d_3 – диаметр электрода, м; h_3 , $h_м$, $h_ш$ – высота заглубления дуги общая, в металл, в шлак соответственно, м; γ – угол, образованный горизонтальной плоскостью торца электрода и наклонной плоскостью, возникающей на электроде вследствие электродинамического перемещения дуги от оси электрода к его периферии, град.; 0–5 – расчетные точки на стенах печей; $l_д$ – длина дуги, м; $l_{отк}$ – длина открытой части дуги, излучающей тепловой поток на расчетную площадку, м; r – луч, расстояние от дуги до расчетной точки на стенах, м; α – угол между лучом r от середины открытой части дуги и перпендикуляром $N1$ к оси дуги, проведенным в начало луча r на дуге, град.; β – угол между нормалью $N2$ к поверхности стен в расчетную точку и лучом r , град.; Θ – угол электродинамического отклонения оси дуги от оси электрода (определяется по методике, изложенной в работе [1])

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ПЫЛЕГАЗОВОЙ АТМОСФЕРЫ ПЕЧИ НА ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ НА СТЕНЫ И ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ С ОТХОДЯЩИМИ ГАЗАМИ И ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДОЙ

Расчет потоков тепловых излучений дуг на водоохлаждаемые панели стен выполнили для печи ДСП-100 для периода окончания расплавления шихты (дуги горят на жидкометаллическую ванну). На рис. 4 видны ванна металла, водоохлаждаемые панели, кожух, футерованная часть стен, рабочее окно, эркерный выпуск.

Параметры каждой из трех дуг: мощность 18 МВт; напряжение 260 В; ток 69,2 кА; длина 300 мм; $\alpha_{\text{изл}} = 0,92$. Расчет тепловых потоков излучения дуг выполнен на участки стен, расположенные напротив электродов и между электродами при высоте заглубления дуг в печах и ванну металла 70 мм и 300 мм в лучепрозрачной ($k = 0$) и поглощающей ($k = 0,7$) атмосфере печи.

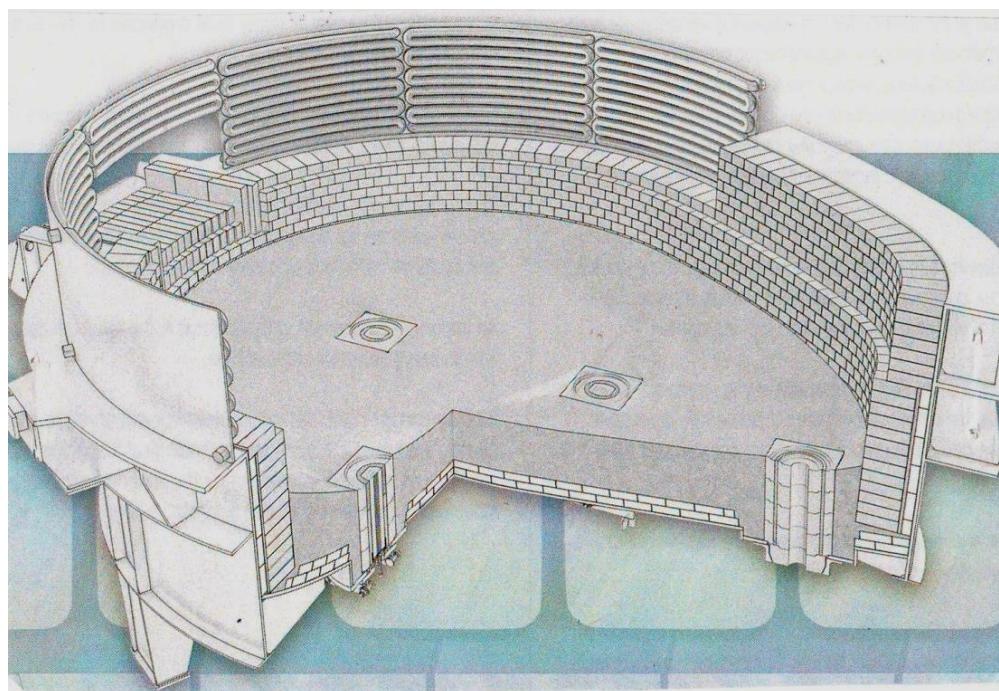


Рис. 4. Внутренний вид свободного пространства ДСП-150

Результаты расчета плотностей потоков тепловых излучений дуг на участки стен, расположенные напротив дуг и между дугами в лучепрозрачной *I* и поглощающей *II* атмосфере печи, представлены на рис. 5.

При отсутствии продувки ванны кислородом и подачи угольного порошка в инжекторы атмосфера печи приближается к лучепрозрачной с $k = 0-0,1$ и тепловые потоки излучения дуг на стены достигают максимальных значений в 600 кВт/м^2 на высоте 0,5 м от уровня ванны металла, тепловые потоки излучения дуг уменьшаются по высоте стен до 260 кВт/м^2 на уровне 2 м от ванны. Аналогичные значения плотностей тепловых потоков на водоохлаждаемые панели стен получены в результате экспериментальных измерений: плотность теплового потока на водоохлаждаемые панели стен изменяется от $100-300 \text{ кВт/м}^2$ в квазистационарных режимах до $600-1000 \text{ кВт/м}^2$ в динамичных процессах [12].

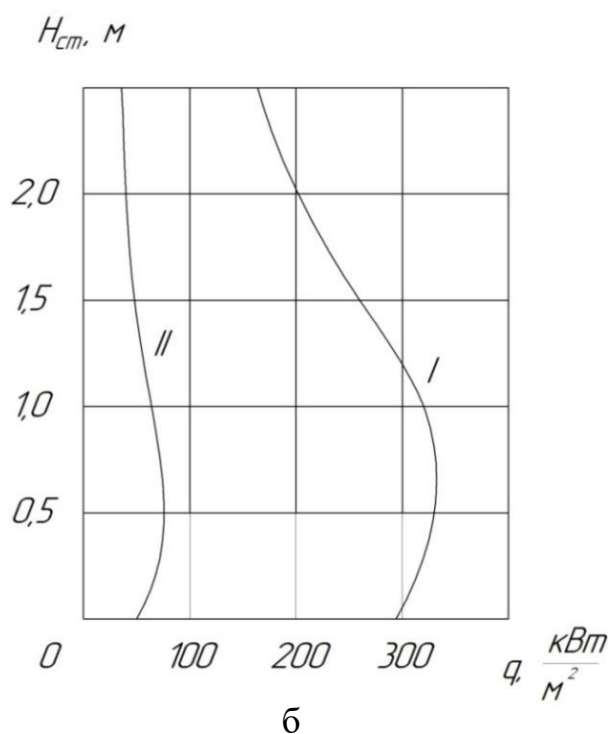
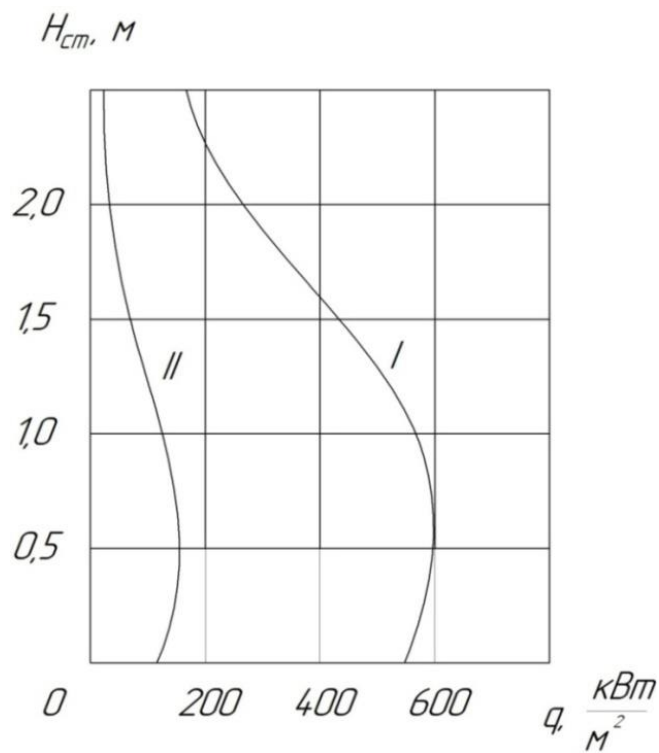


Рис. 5. Распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг высотой 300 мм по высоте стен печи ДСП-100 при высоте заглибления дуг 70 мм в прозрачной и поглощающей атмосфере печи по участкам стен, расположенным: а – напротив дуги; б – между дугами

При продувке ванны металла кислородом и вдувании угольного порошка инжекторами в ванну коэффициент поглощения атмосферы печи увеличивается до $k = 0,7$, тепловые потоки излучения дуг на стены снижаются в 3–8 раз и составляют 150 кВт/м^2 на высоте 0,5 м от уровня ванны металла и 30 кВт/м^2 на уровне 2 м от ванны. Следовательно, при отсутствии продувки ванны металла кислородом и при неработающем инжекторе угольного порошка тепловые нагрузки на стены достигают максимальных значений. Этот период работы является наиболее тяжелым для водоохлаждаемых панелей стен. В лучепрозрачной атмосфере печи тепловые потери с охлаждающей водой панелей достигают максимальных значений, а тепловые потери с газами – минимальных (см. рис. 5). Результаты расчетов и вышеизложенный вывод подтверждают результаты экспериментальных исследований работы печи ДСП-10 и ДСП-100 с водоохлаждающим сводом [13]. Тепловые потери с водой водоохлаждаемых панелей зависят от периода плавки и, соответственно, задымленности атмосферы печи. Задымленность атмосферы печи максимальна в период расплавления, снижается в окислительный период и продолжает снижаться в восстановительный. При максимальной задымленности атмосферы печи большая часть теплового излучения дуг поглощается газами, меньшая часть излучения достигает панелей стен и поглощается охлаждающей водой. При максимальной задымленности атмосферы печи тепловые потери с водой минимальны.

При минимальной задымленности и лучепрозрачной атмосфере печи основная часть теплового излучения дуг достигает водоохлаждаемых панелей стен и поглощается водой. При минимальной задымленности атмосферы тепловые потери с водой максимальны. Таким образом, в зависимости от коэффициента поглощения пылегазовой атмосферы печи перераспределяются тепловые потери излучения дуг, уносимые отходящими газами и водой водоохлаждаемых панелей. Результаты расчетов подтверждаются результатами экспериментальных исследований: в период плавления шихты, когда коэффициент поглощения атмосферы печи имеет максимальное значение, потери с охлаждающей водой составляют 10 % от всех потерь с охлаждающей водой за плавку, в окислительный период этот показатель равен 35 %; в восстановительный период, когда атмосфера печи близка к лучепрозрачной, тепловые потери с охлаждающей водой панелей составляют 55 % от тепловых потерь с охлаждающей водой за плавку [13]. Следовательно, результаты экспериментальных исследований тепловых потоков, падающих на водоохлаждаемые панели, и тепловых потерь с охлаждающей водой подтверждают результаты расчетов тепловых потоков излучений дуг на стены в печи ДСП-100 в лучепрозрачной и поглощающей атмосфере.

Участки стен, расположенные между электродами, находятся на большем расстоянии от дуг по сравнению с участками стен, расположенными напротив дуг, поэтому тепловые потоки излучения дуг на данные участки стен меньше, чем на участки, расположенные напротив электродов и дуг. Как видно из результатов расчета (см. рис. 5б), тепловые потоки излучения дуг на высоте стен 0,5 м составляют 360 кВт/м^2 в лучепрозрачной среде, что в 1,7 раза меньше потоков на участки стен, расположенные на аналогичной высоте напротив дуг. На высоте 2 м тепловые потоки излучения дуг в лучепрозрачной среде на участки стен, расположенные между электродами, составляют 200 кВт/м^2 , или в 1,3 раза меньше тепловых потоков дуг на участки стен, расположенные напротив электродов и дуг. В 1,3–1,7 раза меньше потоки теплового излучения дуг в поглощающей среде на участки стен, расположенные между электродами, по сравнению с тепловыми потоками дуг на участки стен напротив электродов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенными аналитическими исследованиями установлено, что в ДСП с конвейерной загрузкой шихты дуги в течение всего времени плавки горят на ванну металла, поэтому в процессе плавки обычно стремятся поддерживать вспененный шлак для закрытия дуг, экранирования их теплового излучения на стены и свод и увеличения теплового излучения на ванну металла, шлак. Для вспенивания шлака в течение всего времени плавки используют угольный порошок, подаваемый в шлак инжектором. Работа инжектора характеризуется возрастанием количества и коэффициента поглощения газов, удаляемых из печи. Потери с отходящими газами максимальны и составляют до 31 % в расходной части энергобалансов ДСП с конвейерной загрузкой шихты. Пылегазовая атмосфера в ДСП с конвейерной загрузкой имеет максимальный коэффициент поглощения, тепловое излучение дуг поглощается пылегазовой атмосферой и тепловые потоки на водоохлаждаемые панели имеют минимальное значение, минимальны и потери с охлаждающей водой.

В печах с загрузкой шихты корзинами дуги длительное время горят в колодцах, экранированы шихтой, вследствие чего расход угольного порошка в 1,5 раза меньше по сравнению с ДСП с конвейерной загрузкой шихты, потери тепла с отходящими газами также меньше и составляют 22 %, потери с охлаждающей водой – 8 %. В ДСП тепловые потоки от дуг на стены достигают максимальных значений в лучепрозрачной среде, снижаются с ростом запыленности атмосферы и достигают минимальных значений при максимальном коэффициенте поглощения пылегазовой атмосферы печи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань. 2014. 384 с.
2. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления. Старый Оскол: ТНТ. 2021. 324 с.
3. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия. 1981. 344 с.
4. Огороков Н.В. Дуговые сталеплавильные печи. М.: Металлургия. 1971. 347 с.
5. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия. 1985. 280 с.
6. Макаров А.Н., Соколов А.Ю. Электрические, геометрические, тепловые параметры дуг, горящих в парах металлов // *Электromеталлургия*. 2009. № 11. С. 19–24.
7. Макаров А.Н., Кузнецов А.В., Рыбакова В.В., Галичева М.К. О влиянии формы электрода и параметров дуги на ее заглубление в ванну металла в дуговых сталеплавильных печах // *Промышленная энергетика*. 2014. № 10. С. 10–15.
8. Makarov A.N. Change in arc efficiency during melting in steel-melting arc furnaces // *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. № 3-4, pp. 298–302.
9. Makarov A.N. Effect of the architecture on energy efficiency of electric arc furnaces of conventional and consteel designs // *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. № 9-10, pp. 882–891.
10. Нефедов А.В., Нефедова Е.В. Импортозамещающая технология выгрузки пыли из бункеров электросталеплавильного цеха ОАО «Уральская сталь» // *Сталь*. 2015. № 12. С. 74–76.

11. Симонян Л.М., Хилько А.А., Лысенко А.А., Михалчан А.А., Сальникова П.Ю. Электро-сталеплавильная пыль как дисперсная система // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2010. № 11. С. 68–75.
12. Кузьмин М.Г., Чередниченко В.С., Бикеев Р.А., Чередниченко М.В. Водоохлаждаемые узлы сверхмощных дуговых сталеплавильных печей // *Электрометаллургия*. 2014. № 7. С. 8–16.
13. Сосонкин О.М., Кудрин В.А. Этапы проведения работ и результаты освоения плавки стали в ДСП с водоохлаждаемыми сводом и стенами // *Электрометаллургия*. 2008. № 11. С. 14–19.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Влияние задымленности атмосферы и высоты шлака на теплообмен в дуговых сталеплавильных печах. Часть I. Влияние задымленности атмосферы на потери с газами и водой // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 2 (10). С. 67–77.

INFLUENCE OF ATMOSPHERIC SMOKING AND SLAG HEIGHT ON HEAT EXCHANGE IN ARC STEEL MELTING FURNACES. PART I. INFLUENCE OF ATMOSPHERIC HUMIDITY ON LOSSES WITH GASES AND WATER

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The composition of the dust and gas atmosphere affects the heat transfer in the arc steelmaking furnace. With a significant dustiness of the furnace atmosphere, the heat flux of arcs emitted by them into the free, not filled with charge, space is mainly absorbed by the dust-gas medium and carried away from the furnace in the form of heat losses with exhaust gases. In the radiant atmosphere of the furnace, the heat flux of the arcs, radiated by them into the free space, reaches the walls, is absorbed by the water of the water-cooled panels and is carried away from the furnace in the form of heat losses with the cooling water.

Keywords: electric steel, electric arc, heat exchange, heat radiation, furnace.

REFERENCES

1. Makarov A.N. *Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках* [Heat transfer in electric arc and flare metallurgical furnaces and power plants]. St. Petersburg: Lan. 2014. 384 p.

2. Dorofeev G.A., Zinyagin G.A., Makarov A.N. Proizvodstvo stali na osnove zheleza pryamogo vosstanovleniya [Production of steel based on direct reduced iron]. Stary Oskol: TNT. 2021. 324 p.
3. Nikolsky L.E., Smolyarenko V.D., Kuznetsov L.N. Teplovaya rabota dugovyh staleplavil'nyh pechej [Thermal work of arc steel-making furnaces]. Moscow: Metallurgiya. 1981. 344 p.
4. Okorokov N.V. Dugovye staleplavil'nye pechi [Electric arc furnaces]. Moscow: Metallurgy. 1971. 347 p.
5. Egorov A.V. Electroplavilnye pechi chernoy metallurgii [Electric melting furnaces for ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya. 1985. 280 p.
6. Makarov A.N., Sokolov A.Yu. Electrical, geometric, thermal parameters of arcs burning in metal vapors. *Electrometallurgy*. 2009. No. 11, pp. 19–24. (In Russian).
7. Makarov A.N., Kuznetsov A.V., Rybakova V.V., Galicheva M.K. On the influence of the shape of the electrode and the parameters of the arc on its deepening into the metal bath in arc steel-making furnaces. *Promyshlennaya Energetika*. 2014. No. 10, pp. 10–15. (In Russian).
8. Makarov A.N. Change in arc efficiency during melting in steel-melting arc furnaces. *Metallurgist*. 2017. Vol. 61. No. 3-4, pp. 298–302.
9. Makarov A.N. Effect of the architecture on energy efficiency of electric arc furnaces of conventional and Consteel designs. *Metallurgist*. 2019. Vol. 62. No. 9-10, pp. 882–891.
10. Nefedov A.V., Nefedova E.V. Import-substituting technology for unloading dust from bunkers of the electric steel-making shop of OJSC Ural Steel. *Steel*. 2015. No. 12, pp. 74–76. (In Russian).
11. Simonyan L.M., Khilko A.A., Lysenko A.A., Mihalchan A.A., Salnikova P.Yu. Electric steel-smelting dust as a dispersed system. *Izvestiya vuzov. Ferrous Metallurgy*. 2010. No. 11, pp. 68–75. (In Russian).
12. Kuzmin M.G., Cherednichenko V.S., Bikeev R.A., Cherednichenko M.V. Water-cooled units of heavy-duty arc steel-making furnaces. *Electrometallurgy*. 2014. No. 7, pp. 8–16. (In Russian).
13. Sosonkin O.M., Kudrin V.A. Stages of work and the results of mastering steel melting in a chipboard with a water-cooled roof and walls. *Elektrometallurgiya*. 2008. No. 11, pp. 14–19. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. Influence of atmospheric smoking and slag height on heat exchange in arc steel melting furnaces. Part I. Influence of atmospheric humidity on losses with gases and water // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 2 (10), pp. 67–77.

УДК 621.313

МОМЕНТЫ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПРЯМОЙ И НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СИММЕТРИИ

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

¹Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

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

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

Аннотация. Рассматривается понятие момента n -го порядка плоской пластины относительно заданной прямой. Прямая объявляется линией n -симметрии в случае, если моменты n -го порядка двух подпластин, на которые исходная пластина делится этой прямой, одинаковы. При этом линии 0-симметрии оказываются линиями полумасс, а линии 1-симметрии – линиями равновесия. На более общий случай линий n -симметрии переносится лемма, доказанная ранее для линий полумасс и линий равновесия.

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

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-78-84

ВВЕДЕНИЕ

На данный момент существует большое количество технологий и методов механической и физико-технической обработки деталей машин (они описаны, например, в работах [1–13]). При выборе какой-либо из этих технологий часто приходится для изготовления и балансировки деталей электрических машин учитывать распределение массы внутри обрабатываемой детали. Это распределение определяется соответствующей функцией плотности, поэтому представляет интерес изучение свойств функции плотности, в том числе и тех, которые связаны с каким-либо видом симметрии. В работах [14–20] рассматривались вопросы симметрии функции плотности, зависящей от двух переменных, и плоские детали (называемые *пластинами* [16]). В статьях [21–24] были описаны объемные детали (таким образом, были освещены вопросы симметрии функции плотности, зависящей от трех переменных). Данная статья продолжает исследования симметрии плоских деталей (пластин), т. е. симметрии функции плотности, зависящей от двух переменных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБОСНОВАНИЯ

Рассмотрим плоскость с заданной на ней прямоугольной декартовой системой координат. *Простой областью* называется область этой плоскости, ограниченная замкнутой линией без самопересечений (граница области считается частью области, таким образом, всякая простая область *замкнута*). 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 двух переменных $f(x, y)$ называется *пластиной* D , при этом функция $f(x, y)$ представляет собой *плотность* пластины D . Подобласть области S вместе с соответствующим ограничением функции $f(x, y)$ называется *подпластиной* пластины D (заметим, что область подпластины, в отличие от области пластины, не обязана быть простой).

Массой пластины D называется $m(D) = \iint_S f(x, y) dx dy$. Несмотря на то, что

функция $f(x, y)$ в некоторых точках области S может быть равной нулю, для любой пластины D предполагается, что выполнено обязательное дополнительное условие: масса самой пластины D и масса всякой ее подпластины должны быть больше нуля.

Прямая линия называется *линией полумасс* пластины D , если она делит эту пластину на две подпластины одинаковой массы. Прямая линия называется *линией равновесия* пластины D , если она делит область S пластины D на две подобласти – S_1 и S_2 – так, что $\iint_{S_1} r(x, y) f(x, y) dx dy = \iint_{S_2} r(x, y) f(x, y) dx dy$, где $r(x, y)$ – расстояние от точки

(x, y) до данной прямой (заметим, что прямая является линией равновесия пластины в том и только том случае, когда эта пластина, положенная на лезвие бритвы вдоль данной прямой, будет сохранять равновесие).

Рассмотренные выше определения соответствуют работе [16]. Они могут быть представлены как частные случаи одного более общего определения при помощи понятия момента n -го порядка пластины относительно заданной прямой.

Пусть имеются (рис. 1) прямая L и пластина D с областью S и функцией плотности $f(x, y)$. *Моментом n -го порядка пластины D относительно прямой L* называется $M_n(D) = \iint_S (r(x, y))^n f(x, y) dx dy$, где $r(x, y)$ – расстояние от точки (x, y) до прямой L .

Заметим, что значение момента $M_n(D)$ не зависит от выбора системы координат, поскольку функции $f(x, y)$ и $r(x, y)$ при заданной прямой L – функции точки пластины. Легко заметить, что $M_0(D)$ – это масса $m(D)$ пластины D , $M_1(D)$ – это *статический момент пластины D относительно прямой L* , а $M_2(D)$ – это *момент инерции пластины D относительно прямой L* (хорошо известные определения статического момента и момента инерции можно найти, например, в § 53.6 учебника [25]).

Пусть прямая L делит пластину D на две подпластины – D_1 и D_2 – с областями S_1 и S_2 соответственно (рис. 2). Назовем прямую L *линией n -симметрии пластины D* , если $M_n(D_1) = M_n(D_2)$. Очевидно, что линии полумасс теперь оказываются линиями 0-симметрии, а линии равновесия – линиями 1-симметрии. Таким образом, линия 0-симметрии делит пластину на две подпластины так, что массы этих подпластин одинаковы, линия 1-симметрии – так, что статические моменты этих подпластин одинаковы, линия 2-симметрии – так, что их моменты инерции одинаковы.

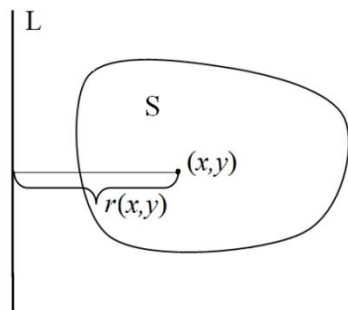
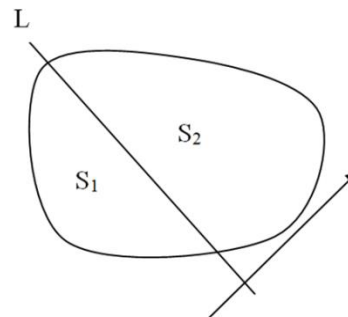


Рис. 1. Момент относительно прямой

Рис. 2. Линия n -симметрии

Данная ниже лемма представляет собой обобщение лемм 1 и 2 из работы [16].

Лемма. *Существует единственная линия n -симметрии пластины D , параллельная данной прямой.*

Доказательство приведем тем же способом, что и доказательства лемм 1 и 2 в работе [16]. Пусть прямая L , проведенная параллельно некоторой изначально заданной прямой, делит пластину D на две подпластины – D_1 и D_2 – с областями S_1 и S_2 так, как показано на рис. 2. Будем перемещать прямую L , оставляя параллельной самой себе, в перпендикулярном ей направлении (в направлении, показанном на рис. 2 стрелкой). При этом разность интегралов

$$\iint_{S_1} (r(x, y))^n f(x, y) dx dy - \iint_{S_2} (r(x, y))^n f(x, y) dx dy$$

будет строго возрастать, так как первый из них будет увеличиваться (поскольку будет расти область S_1), а второй уменьшаться (поскольку будет сокращаться область S_2). Очевидно, что при одном крайнем положении (когда область S_1 очень мала) значение этой разности будет меньше нуля, а при другом (когда область S_2 очень мала) – больше нуля. Из соображений непрерывности можно заключить, что найдется единственное промежуточное положение прямой L , а именно такое, когда рассматриваемая разность будет равна нулю. Это положение прямой L и определит единственную линию n -симметрии пластины D , параллельную изначально заданной прямой.

В связи с доказанной леммой выглядит естественным следующее определение: *центром n -симметрии пластины* называется точка пересечения всех ее линий n -симметрии. Центр n -симметрии пластины существует в том и только том случае, когда все ее линии n -симметрии пересекаются в одной точке. Легко заметить, что центр 0-симметрии пластины является ее центром s -симметрии, а центр 1-симметрии – центром c -симметрии. Как было установлено в статьях [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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Введенные в статье понятия и установленная лемма позволяют представить рассматривавшиеся ранее отдельно в статьях [14–20] для случая плоских пластин понятия c -симметрии и s -симметрии как частные случаи единого понятия n -симметрии.

При этом s -симметрия выступает как 0-симметрия, а c -симметрия – как 1-симметрия. Новое понятие 2-симметрии может оказаться полезным в случаях, когда возможно вращение рассматриваемой пластины вокруг заданной прямой.

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. В 2 т. М.: Высшая школа. 1983. 208 с.
2. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение. 1993. 336 с.
3. Вороничев Н.М., Тартаковский Ж.Э., Генин В.Б. Автоматические линии из агрегатных станков. М.: Машиностроение. 1979. 487 с.
4. Дальский А.М., Гаврилюк В.С. Механическая обработка материалов. 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 / А.Т. Кравец [и др.]. 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. Письменный Д.Т. Конспект лекций по высшей математике. М.: Айрис-пресс. 2007. 604 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ШУМ Александр Анатольевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: shum@tstu.ver.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, 141005, Россия, Московская область, г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1. E-mail: vetkin@mgul.ac.ru

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

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.

MOMENTS OF A FLAT PLATE RELATIVE TO A STRAIGHT LINE AND SOME QUESTIONS OF SYMMETRY

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

¹*Tver State Technical University (Tver)*

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

Abstract. The concept of n -th order moment of a flat plate relative to a given straight line is considered. A straight line is declared to be a line of n -symmetry if the moments of the n -th order of two sub-plates into which the original plate is divided by this straight line are the same.

In this case, the lines of 0-symmetry turn out to be half-mass lines, and the lines of 1-symmetry – lines of equilibrium. The lemma proved earlier for half-mass lines and equilibrium lines can be carried over to the more general case of lines of n -symmetry.

Keywords: symmetry, c -symmetry, s -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., Drozhzhalova V.I., Sedykhin F.V., Smolentsev V.P., Yampolsky V.M. *Elektrofizicheskie i elektrohimicheskie metody obrabotki materialov* [Electrophysical and electrochemical methods of processing materials]. In 2 v. Moscow: Vysshaja shkola. 1983. 208 p.
2. Vereschaka A.S. *Rabotosposobnost' rezhushchego instrumenta s iznosostojkimi pokrytiami* [The performance of the cutting tool with wear-resistant coatings]. Moscow: Mashinostroenie. 1993. 336 p.
3. Voronichev N.M., Tartakovskiy J.E., Genin V.B. *Avtomaticheskie linii iz agregatnyh stankov* [Automatic lines of modular machines]. Moscow: Mashinostroenie. 1979. 487 p.
4. Dalskiy A.M., Gavrilyuk, V.S. *Mekhanicheskaya obrabotka materialov* [Mechanical treatment of materials]. Moscow: Mechanical Engineering. 1981. 266 p.
5. Nemilov E.F. *Elektroerozionnaya obrabotka materialov* [Electroerosion treatment of materials]. Leningrad: Mashinostroenie. 1983. 160 p.
6. Poduraev V.N. *Avtomaticheski reguliruemye i kombinirovannye processy rezaniya* [Automatically adjustable and combined cutting processes]. Moscow: Mashinostroenie. 1977. 303 p.
7. Silin S.S. *Metod podobiya pri rezanii materialov* [Method of similarity when cutting materials]. Moscow: Mashinostroenie. 1979. 152 p.
8. Starkov V.K. *Obrabotka rezaniem. Upravlenie stabil'nost'yu i kachestvom v avtomatizirovannom proizvodstve* [Cutting processing. Stability and quality management in automated production]. Moscow: Mashinostroenie. 1989. 297 p.
9. Trent E.M. *Rezanie metallov* [Metal cutting]. Moscow: Mashinostroenie. 1980. 263 p.
10. *Uchastki dlya elektroerozionnoj obrabotki rabochih detalej vyrubnyh shtampov i press-form / A.T. Kravec [i dr.]* [Areas for electrical discharge machining of working parts of cutting dies and molds / A.T. Kravec [etc]]. Moscow: 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]. Moscow: Mashgiz. 1953. 173 p.
12. Yanushkin A.S., Shorkin V.S. *Kontaktnye processy pri elektroalmaznom shlifovanii* [Contact processes in electro-diamond grinding]. Moscow: Mashinostroenie-1. 2004. 230 p.
13. Yastcheritsyn P.I., Feldshtein E.E., Korniewicz M.A. *Teoriya rezaniya* [Theory of cutting]. Minsk: Novoe znanie. 2006. 512 p.
14. Shum A.I.A. On the symmetry of the functions defined in the circle. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2014. Vol. 25, pp. 3–8. (In Russian).
15. Shum A.I.A. The comment about s -symmetric functions. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2015. Vol. 27, pp. 3–6. (In Russian).
16. Shum A.I.A. About the centers of symmetry of a function of two variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta*. 2016. Vol. 30, pp. 19–23. (In Russian).

17. Shum Al.A. About the centers of symmetry of a function defined in a convex domain of the plane. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*. 2017. Vol. 31, pp. 19–22. (In Russian).
18. Shum Al.A. Symmetric line of a function of two variables. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehniceskogo 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. Series «Technical Sciences»*. 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. Series «Technical Sciences»*. 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. Series «Construction. Electrical Engineering and Chemical Technologies»*. 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. Series «Construction. Electrical Engineering and Chemical Technologies»*. 2020. No. 2 (6), pp. 57–65. (In Russian).
25. Pismennyi D.T. Lecture notes on higher mathematics (full course). Moscow: 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 of the Department of Applied Mathematics, Informatics and Computer Engineering, Mytishchi branch of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, 1st Institutskaya street, Mytishchi city, Moscow region, 141005, Russia. E-mail: vetkin@mgul.ac.ru

SHUM Anatoliy 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. Moments of a flat plate relative to a straight line and some questions of symmetry // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 2 (10), pp. 78–84.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 621.892

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ СИНТЕЗА МАГНИТНЫХ СМАЗОЧНЫХ НАНОМАСЕЛ НА ОСНОВЕ ВИСКОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*А.Н. Болотов, О.О. Новикова, А.В. Новиков**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков А.В., 2021

Аннотация. Разработано оборудование для экспериментальных исследований реологического поведения магнитных наножидкостей. Указано, что конструкция магнитного ротационного вискозиметра позволяет измерять стандартные характеристики коллоидных систем и устанавливать структурные особенности жидкостей при сдвиговых напряжениях в широком диапазоне магнитных полей. Реализован новый способ повышения антифрикционных и противоизносных свойств магнитных наномасел. Предложено оценивать энергию активации химической реакции стабилизации коллоидных систем с помощью полимеров на основе результатов вискозиметрических исследований. Исходными данными для расчета являются экспериментальные реологические кривые, снятые на промежуточных этапах синтеза полимерных оболочек на дисперсных частицах в процессе получения магнитных наножидкостей. Оценена скорость реакции полимеризации в зависимости от температуры. Отмечено, что полученные результаты позволяют получать магнитные масла с заданными реологическими и триботехническими свойствами.

Ключевые слова: коллоидные системы, магнитная наножидкость, магнитные смазочные наномасла, вискозиметрические исследования, энергия активации.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-85-95

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большой научный и практический интерес вызывают коллоидные системы, содержащие нанодисперсную магнитную фазу [1–6]. Такие системы принято называть магнитными нанодисперсными жидкостями, или наножидкостями. Магнитные свойства жидкостям придают твердые ферри, или ферромагнитные частицы размером от 10 до 100 нм. Добавление в несущую жидкую основу магнитных частиц приводит к существенному изменению их физических свойств. Существуют различные методы исследования магнитных наножидкостей, позволяющие глубже раскрыть их свойства и, следовательно, полноценно использовать в научных и практических целях [7, 8].

Наиболее широко в исследованиях магнитных наножидкостей применяют магнитометрические методы [9, 10], которые дают возможность установить особенности процессов намагничивания и перемагничивания магнитных коллоидов, агрегации частиц, структурирования и т. д. Не менее часто используют методы реометрии для

экспериментального определения реологического поведения магнитных наножидкостей. Экспериментальное изучение процессов течения магнитной наножидкости позволяет получать новые выводы о механизме диссипативных процессов, структурной стабильности и определить такие параметры частиц, как, например, гидродинамический размер и геометрия.

Важность измерения реологических свойств магнитных наножидкостей обусловлена также необходимостью постоянного технологического контроля их производства. Существенные отклонения реологических свойств наножидкостей от принятых норм могут не только снизить качество готовых технических устройств, но и привести к их выходу из строя.

Одной из разновидностей магнитных наножидкостей являются магнитные смазочные наномасла, которые перспективны для триботехнических систем [11–13]. Схематично технологии синтеза магнитных наножидкостей и наномасел в основном совпадают. Однако более высокие требования к коллоидной стабильности наномасел в условиях фрикционного контакта диктуют необходимость в новых подходах к синтезу защитных оболочек на частицах. Предложено для получения стабильных наномасел защищать частицы полимерными оболочками, синтезированными в ходе получения наномасел. Для более глубокого понимания процесса поликонденсации желательно знать энергию активации этого процесса. Кроме того, знание энергии активации позволяет контролировать технологический процесс получения наномасел с изначально заданными реологическими свойствами, зависящими от конкретных условий применения их в трибоузлах. Предложен новый физико-химический подход к определению энергии активации, основанный на реологических измерениях.

Цели работы – проектирование и реализация конструкции магнитного ротационного вискозиметра для исследования реологических свойств магнитных наножидкостей, а также разработка нового подхода к определению энергии активации процесса поликонденсации сольватных оболочек на основе вискозиметрических исследований.

КОНСТРУКЦИЯ МАГНИТНОГО КОАКСИАЛЬНОГО ВИСКОЗИМЕТРА

Для исследования реологических свойств магнитных наножидкостей разработан ротационный вискозиметр (рис. 1). За основу взята конструкция, состоящая из двух вращающихся коаксиальных цилиндров, в зазор между которыми вставлен колоколообразный тонкостенный измерительный цилиндр (такие вискозиметры обычно называют вискозиметрами колоколообразного типа). Магнитный вискозиметр предназначен для реологических исследований в режиме, когда скорость вращения (градиент скорости сдвига) остается постоянной.

Цилиндрический корпус прибора 1 и магнитопровод 3 из магнитомягкой стали Ст3 установлены коаксиально на едином основании. Внутри корпуса установлен постоянный магнит 2, изготовленный из сплава SmCo_5 , обладающего хорошей температурной стабильностью (вплоть до 200 °С). К одной из полярных поверхностей магнита примыкает цилиндрический магнитопровод 3 с осевым отверстием. Магнит 2 и цилиндр 3 центрируются немагнитным кольцом 4. На магнитопровод 3 надета немагнитная втулка 5, определяющая рабочий зазор прибора, заполняемого исследуемой жидкостью.

Магнитная система, образованная магнитом 2, корпусом 1, цилиндром 3, втулкой 5, создает радиальное поле в рабочем зазоре 9 между коаксиальными магнитными цилиндрами. Для дискретного уменьшения магнитного поля в рабочем зазоре,

заполненном жидкостью, на дно зазора помещают магнитопроводящие кольца различной толщины, выполняющие роль магнитных шунтов. Эффект достигается за счет того, что часть магнитного потока, создаваемого постоянным магнитом, проходит через кольцо и не попадает в зазор. Таким образом, индукция магнитного поля в зазоре регулируется практически от нуля до 0,26 Тл.

Образовавшиеся кольцевые зазоры 9 заполняются исследуемой жидкостью. Небольшая относительная величина зазора позволяет создать однородное магнитное поле в изучаемой жидкости.

В рабочую область между коаксиальными цилиндрами вставлен колоколообразный тонкостенный цилиндр 6 из немагнитного алюминиевого сплава Д16, который для центрирования насажен на ось 7. Для снижения трения оси колоколообразного цилиндра и электрической изоляции его от корпуса на поверхность оси наносили антифрикционное полимерное покрытие толщиной около 5 мкм с хорошими диэлектрическими свойствами. Высота слоя жидкости, находящейся в контакте с полым цилиндром 6, может изменяться от 0 до 30 мм; точное значение высоты слоя жидкости легко определяется по следу, оставленному ей на поверхности цилиндра 6. Приведенная конструкция прибора отличается простотой достижения концентрического расположения цилиндрических измерительных поверхностей.

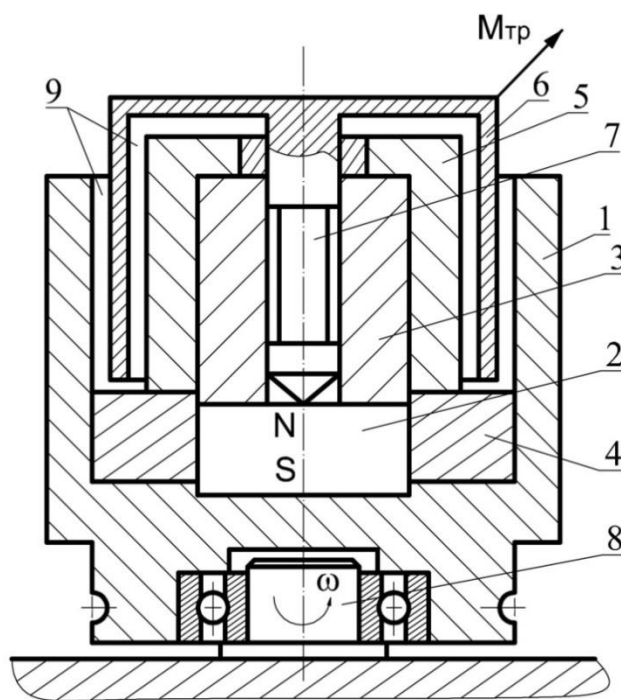


Рис. 1. Схема измерительного узла ротационного вискозиметра:

- 1 – коаксиальный цилиндр; 2 – постоянный магнит; 3 – магнитопровод;
4 – немагнитное кольцо; 5 – втулка; 6 – колоколообразный цилиндр; 7 – ось;
8 – подшипник качения; 9 – кольцевые зазоры;

$M_{тр}$ – момент силы трения; S, N – полюса магнита; ω – угловая скорость

Корпус прибора 1 базируется на наружном кольце подшипника качения 8 (см. рис. 1). Внутреннее кольцо подшипника неподвижно закреплено на станине. В

нижней части корпуса прибора имеется шкив для осуществления его вращения приводным ремнем. Чтобы организовать вращение коаксиальных цилиндров, использовали высоко-скоростной коллекторный двигатель постоянного тока, подключенный к многоступенчатому редуктору для снижения скорости вращения и повышения вращающего момента. Вращение от редуктора к корпусу прибора передавалось с помощью ременной передачи. Изменяя скорость вращения электродвигателя, добивались необходимого градиента скорости сдвига в исследуемой жидкости. Для сохранения вращающего момента электродвигателя при изменении скорости вращения управление его работой осуществлялось ШИМ-контроллером. Скорость вращения корпуса прибора изменялась в диапазоне от 0,1 до 600 об/мин. Для установления заданной скорости вращения коаксиальных цилиндров бесконтактно измеряли скорость вращения электродвигателя с помощью лазерного тахометра АТ-6. Прибор позволяет измерять частоту вращающихся тел в диапазоне $2-10^4$ об/мин с точностью до 0,05 % и разрешением 0,1 об/мин.

Для измерения вращающего момента, действующего на колоколообразный цилиндр, применяли тензорезисторный датчик с упругим элементом в виде консольной балки. Сила, действующая на измерительный цилиндр, передавалась на тензобалку через тонкую нерастяжимую нить. Балка изготавливалась из рессорно-пружинной стали 50ХГ, отличающейся увеличенным пределом текучести. Результирующая сила, действующая на тензобалку, складывается из силы внутреннего трения в магнитной наножидкости и силы внешнего трения на оси измерительного цилиндра.

Контроль повышения температуры исследуемой жидкости в результате тепловыделения от внутреннего трения производился косвенно по температуре поверхности неподвижного цилиндра 6 (см. рис. 1). Температура поверхности измерялась бесконтактно с помощью пирометра. Относительная ошибка измерения температуры не превышает 1 %, разрешающая способность прибора 0,1 °С. Пирометр был настроен для измерения температуры поверхности с коэффициентом излучения, равным 0,95. Чтобы соблюсти это условие, нерабочую поверхность измерительного цилиндра покрыли белой краской, содержащей окись цинка.

При дискретном изменении скорости вращения устанавливалась зависимость момента трения от частоты вращения и затем рассчитывалась зависимость напряжения сдвига от градиента скорости сдвига. Измерения прекращались, если температура внешнего вращающего цилиндра повышалась более чем на 1,5 °С.

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ПРОЦЕССА ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ МАГНИТНЫХ НАНОЖИДКОСТЕЙ – СМАЗОЧНЫХ НАНОМАСЕЛ

Для достижения требуемых антифрикционных и противоизносных свойств магнитных наномасел был предложен способ стабилизации коллоидных систем с помощью полимеров [14]. Однако он не получил широкого распространения из-за низкой намагниченности получаемых масел, вызванной применением полимеров с большой молекулярной массой, приводящей к росту вязкости коллоида и уменьшению объемной доли магнитных частиц.

Разработана технология получения магнитных наномасел путем синтеза полимерных сольватных оболочек непосредственно на магнитных частицах [15]. Ее успешная реализация определяет необходимость разработки нового подхода к вискозиметрическим исследованиям кинетических особенностей протекания реакции синтеза полимерных оболочек на дисперсных частицах в процессе получения магнитных

наножидкостей – смазочных наномасел.

Рассмотрим зависимость скорости реакции синтеза полимерных оболочек от времени (рис. 2), полученную с помощью магнитного ротационного вискозиметра. Временная зависимость вязкости наномасла представляет собой зависимость вязкости от степени конверсии мономера. Установленная экспериментально динамика изменения вязкости магнитного коллоида характерна именно для радикальной полимеризации, протекающей по цепному механизму [16].

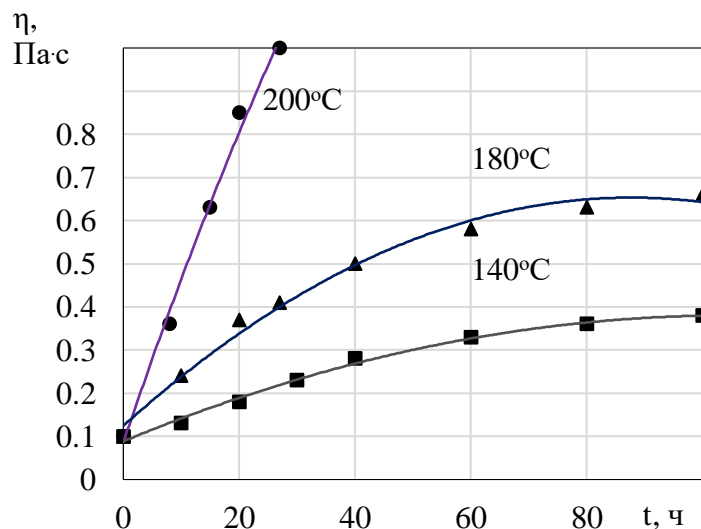


Рис. 2. Зависимость вязкости магнитного коллоида на основе диэфиров карбоновых кислот от времени синтеза полимерных оболочек при различных температурах

Скорость роста ν цепи можно принять равной скорости исчезновения мономера [17], так как расход мономера в реакциях инициирования и переноса цепи пренебрежимо мал:

$$\nu = -\frac{d[M]}{dt}, \quad (1)$$

где t – время; $[M]$ – концентрация мономера.

После некоторых преобразований скорость реакции роста цепи можно представить следующим образом:

$$\nu = K[I]^{1/2}[M]; \quad (2)$$

$$K = \frac{K_i^{1/2}K_g}{K_b^{1/2}},$$

где $[I]$ – концентрация инициатора; K_i , K_g , K_b – константы скорости инициирования, роста и обрыва цепи соответственно.

Используя уравнение Аррениуса, описывающее влияние температуры на скорость химических реакций, можно переписать выражение (2) так:

$$\ln v = A_1 [M][I] \exp\left(-\frac{E}{R_k T}\right); \quad (3)$$

$$E = E_s + \frac{E_i}{2} + \frac{E_b}{2},$$

где A_1 – предэкспоненциальный множитель (не зависит от температуры); R_k – универсальная газовая постоянная; T – температура; E – суммарная энергия активации полимеризации; E_i , E_s , E_b – энергия активации стадии инициирования, роста и обрыва цепи соответственно.

Энергия активации – эмпирически определяемый параметр, характеризующий показательную зависимость константы скорости реакции от температуры. Скорость химической реакции зависит от величины энергии активации. При этом если энергия активации мала, то за единичное время энергетический барьер преодолет большое число молекул, поэтому скорость реакции будет высокой; если же энергия активации велика, то энергетический барьер преодолет меньшее число молекул, и реакция будет протекать медленно.

Прологарифмируем уравнение (3) и получим удобное для дальнейшего анализа выражение:

$$v = \text{const} - \frac{E}{R_k T}. \quad (4)$$

Вязкость η магнитных наножидкостей в первом приближении можно выразить через вязкость дисперсионной среды η_0 , пользуясь формулой, полученной А. Эйнштейном:

$$\eta = \eta_0 (1 + a\varphi), \quad (5)$$

где a – коэффициент; φ – объемная концентрация дисперсных частиц.

Коэффициент a изменяется от 2,5 при малых концентрациях частиц до 25 при умеренных концентрациях, далеких от значения, соответствующего плотной кубической упаковке. Объемную концентрацию можно выразить через концентрацию частиц в коллоиде n , объем частиц V_p и объем сольватной оболочки V_s : $\varphi = n(V_p + V_s)$. Объем сольватной оболочки приблизительно равен ($V_s \approx V_m N$, где V_m – эффективный объем мономера; N – количество мономеров на поверхности частиц в составе олигомера). С учетом формулы (5) вязкость магнитного коллоида

$$\eta = \eta_0 \left[1 + an(V_p + V_m N)\right]. \quad (6)$$

Продифференцировав уравнение (6) по времени, получим

$$\frac{d\eta}{dt} = \eta_0 an V_m \frac{dN}{dt}. \quad (7)$$

В выражении (7) (см. формулу (1))

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{dM}{dt} = -v.$$

Приведенные на рис. 2 экспериментальные зависимости вязкости магнитного наномасла можно аппроксимировать с хорошей точностью уравнением

$$\eta = (4535 + 840t - 15t^2) \exp(-4700/T). \quad (8)$$

В уравнении (8) численные коэффициенты подобраны таким образом, чтобы размерность вязкости была выражена в единицах динамической вязкости (Па·с), время – в часах, температура – в Кельвинах. Если продифференцировать последнее выражение по времени и учесть выражение (7), тогда можно записать, что

$$v = A_2 \exp(-4700/T), \quad (9)$$

где A_2 – величина, слабо зависящая от времени.

Небольшая зависимость A_2 от времени отражает постепенное уменьшение скорости реакции синтеза оболочек частиц из-за конверсии мономера. После логарифмирования уравнения (9) получим выражение

$$\ln v = \text{const} - 4700/T. \quad (10)$$

Если сравнить выражения (4) и (10), то становится понятно, что суммарная энергия активации полимеризации будет приблизительно равна 39 кДж/моль. Такая энергия активации характерна для реакций с участием радикалов, протекающих относительно быстро. Знание энергии активации позволяет более детально понять кинетику радикальной реакции полимеризации и прогнозировать реологические свойства магнитного наномасла на стадии получения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена конструкция магнитного ротационного вискозиметра, исследования на котором могут проводиться в широком диапазоне значений индукции магнитного поля. Вискозиметр позволяет измерять стандартные характеристики магнитных наножидкостей (коэффициент вязкости, пластическую вязкость, предельное напряжение сдвига и др.), а также изучать структурные особенности жидкостей при сдвиговых напряжениях. Скорость сдвига в жидкости может стабильно поддерживаться в широком диапазоне, а именно $1-5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Процесс образования полимеров характеризуется энергией активации химической реакции между мономерами. Предложен новый подход для определения энергии активации химической реакции полимеризации. Исходные данные для расчета энергии активации получены из экспериментальных реологических кривых, снятых на промежуточных этапах синтеза оболочек. С помощью энергии активации представляется возможным оценить скорость реакции полимеризации в зависимости от температуры и более подробно описать ее химический механизм. Прикладное значение полученных результатов заключается в том, что с их помощью можно получать магнитные масла с заданными реологическими свойствами, целенаправленно изменяя время и температуру синтеза полимерных оболочек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фертман В.Е. Магнитные жидкости: Справочное пособие. Минск: Высшая школа. 1988. 184 с.
2. Pei L., Gong X., Xuan S. Recent progress on the simulation technology of magnetic fluid // *Chinese Science Bulletin*. 2019. Vol. 64. Iss. 15, pp. 1567–1582.
3. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Магнитные силоксановые наножи́дкости, адаптированные для условий граничного трения // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2020. № 12. С. 546–556. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.546
4. Qiu H.Z., Yan H., Zhang P., Liu Q., Tang L. Friction properties of carbonyl iron-based magnetorheological fluid // *Mosaxue Xuebao. Tribology*. 2009. Vol. 29 (1), pp. 61–67.
5. Байбуртский Ф.С. Магнитные жидкости: способы получения и области применения. URL: <http://maimeticliquid.narod.ru/autoritv/008.htm> (дата обращения: 20.08.2021).
6. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. К вопросу о диэлектрическом критерии коллоидной устойчивости магнитных жидкостей // *Вестник Тверского государственного технического университета*. 2017. № 1 (31). С. 93–98.
7. Polunin V.M., Ryapolov P.A., Storozhenko A.M., Shabanova I.A. Structural-acoustic analysis of a nanodispersed magnetic fluid // *Russian Physics Journal*. 2011. Vol. 54 (1), pp. 9–15.
8. Reino L.A.T., Lima T.M., Costa A.S., Bakuzis A.F., Santos C.M.B., Sartoratto P.P.C., Morais P.C. Investigation of colloidal stability and insulation characteristics of magnetic oils // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2012. Vol. 12 (12), pp. 9319–9324.
9. Болотов А.Н., Новикова О.О. Мобильный магнитометр для экспресс-теста намагниченности насыщения магнитных наножи́дкостей // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2020. № 12. С. 557–570. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.557
10. Li W., Zhang Z., Li D. Rheological properties of silicon oil-based magnetic fluid with magnetic nanoparticles (MNPs)-multiwalled carbon nanotube (MWNT) // *Smart Materials and Structures*. 2019. Vol. 28 (6), pp. 065023.
11. Uhlmann E., Spur G., Bayat N., Patzwald R. Application of magnetic fluids in tribotechnical systems // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002. № 252 (1), pp. 336–340.
12. Chen S.F., Zheng M.H., Wang Z.L., Wang Y.B. Research on anti-wear property of synthetic oil-based polymeric α -olefin nano Fe_3O_4 ferrofluids // *Binggong Xuebao/Acta Armamentarii*. 2009. Vol. 30 (4), pp. 457–460.
13. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Смазочные масла, полученные модифицированием магнитных наножи́дкостей // *Материаловедение*. 2019. № 11. С. 29–35. DOI: 10.31044/1684-579X-2019-0-11-29-35
14. Неппер Д. Стабилизация коллоидных дисперсий полимерами. М.: Мир, 1986. 487 с.
15. Болотов А.Н., Новикова О.О. Смазочные свойства магнитных наножи́дкостей на основе эфиров карбоновых кислот // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. 2019. № 11. С. 555–563. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.555
16. Малкин А.Я., Куличихин С.Г. Реология в процессах образования и превращения полимеров. М.: Химия. 1985. 240 с.
17. Савада Х. Термодинамика полимеризации. М.: Химия. 1979. 312 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БОЛОТОВ Александр Николаевич – ученый секретарь ученого совета ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: alnikbltov@rambler.ru

НОВИКОВА Ольга Олеговна – канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: onvk@mail.ru

НОВИКОВ Артем Владиславович – магистр кафедры конструкций и сооружений, инженерно-строительный факультет, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: artmnv75@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков А.В. Определение энергии активации синтеза магнитных смазочных наномасел на основе вискозиметрических исследований // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 2 (10). С. 85–95.

**DETERMINATION OF THE ENERGY OF ACTIVATION
OF THE SYNTHESIS OF MAGNETIC LUBRICANT NANO OILS
BASED ON VISCOSIMETRIC STUDIES**

A.N. Bolotov, O.O. Novikova, A.V. Novikov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. Equipment for experimental studies of the rheological behavior of magnetic nanofluids has been developed. It is indicated that the design of a rotational magnetic viscometer makes it possible to measure the standard characteristics of colloidal systems and to establish the structural features of liquids under shear stresses in a wide range of magnetic fields. A new method has been implemented to improve the antifriction and antiwear properties of magnetic nano-oils. It is proposed to estimate the activation energy of the chemical reaction of stabilization of colloidal systems using polymers based on the results of viscometric studies. The initial data for the calculation are experimental rheological curves taken at intermediate stages of the synthesis of polymer shells on dispersed particles in the process of obtaining magnetic nanofluids. The rate of the polymerization reaction was estimated as a function of temperature. It is noted that the results obtained will make it possible to obtain magnetic oils with specified rheological and tribotechnical properties.

Keywords: colloidal systems, magnetic nanofluid, magnetic lubricating nano-oils, viscometric studies, activation energy.

REFERENCES

1. Fertman V. E. Magnetic liquids: A reference manual. Minsk: Vysshaya shkola. 1988. 184 p.
2. Pei L., Gong X., Xuan S. Recent progress on the simulation technology of magnetic fluid. *Chinese Science Bulletin*. 2019. Vol. 64. Iss. 15, pp. 1567–1582.

3. Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov V.V. Silicone magnetic nanofluids adapted for the conditions of boundary friction. *Physico-chemical aspects of studying clusters, nanostructures and nanomaterials*. 2020. No. 12, pp. 546–556. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.546 (In Russian).
4. Qiu H.Z., Yan H., Zhang P., Liu Q., Tang L. Friction properties of carbonyl iron-based magnetorheological fluid. *Москвe Xuebao. Tribology*. 2009. Vol. 29 (1), pp. 61–67.
5. Bayburtsky F.S. Magnetic liquids: methods of production and areas of application. *Electronic resource*. URL: <http://maimeticliquid.narod.ru/autoritv/008.htm> (date of access: 20.06.2021).
6. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. On the question of the dielectric criterion of the colloidal stability of magnetic liquids. *Bulletin of the Tver State Technical University*. 2017. No. 1 (31), pp. 93–98. (In Russian).
7. Polunin V.M., Ryapolov P.A., Storozhenko A.M., Shabanova I.A. Structural-acoustic analysis of a nanodispersed magnetic fluid. *Russian Physics Journal*. 2011. Vol. 54 (1), pp. 9–15.
8. Reino L.A.T., Lima T.M., Costa A.S., Bakuzis A.F., Santos C.M.B., Sartoratto P.P.C., Morais P.C. Investigation of colloidal stability and insulation characteristics of magnetic oils. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2012. Vol. 12 (12), pp. 9319–9324.
9. Bolotov A.N., Novikova O.O. Mobile magnetometer for rapid test of saturation magnetization of magnetic nanofluids. *Physico-chemical Aspects of Research of Clusters, Nanostructures and Nanomaterials*. 2020. No. 12, pp. 557–570. (In Russian).
10. Li W., Zhang Z., Li D. Rheological properties of silicon oil-based magnetic fluid with magnetic nanoparticles (MNPs)-multiwalled carbon nanotube (MWNT). *Smart Materials and Structures*. 2019. Vol. 28 (6), pp. 065023. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.557
11. Uhlmann E., Spur G., Bayat N., Patzwald R. Application of magnetic fluids in tribotechnical systems. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2002. No. 252, pp. 336–340.
12. Chen S.F., Zheng M.H., Wang Z.L., Wang Y.B. Research on anti-wear property of synthetic oil-based polymeric α -olefin nano Fe_3O_4 ferrofluids. *Binggong Xuebao/Acta Armamentarii*. 2009. Vol. 30 (4), pp. 457–460.
13. Bolotov A.N., Novikov V.V., Novikova O.O. Lubricating oils produced by modification of magnetic nanofluids. *Materials Science*. 2019. No. 11, pp. 29–35. DOI: 10.31044/1684-579X-2019-0-11-29-35 (In Russian).
14. Nepper D. Stabilizacia kolloidnyh dispersiy polimerami [Stabilization of colloidal dispersions by polymers]. Moscow: Mir. 1986. 487 p.
15. Bolotov A.N., Novikova O.O. Lubrication properties of magnetic nanoliquids based on carboxylic acids. *Physico-chemical Aspects of Studying Clusters, Nanostructures and Nanomaterials*. 2019. No. 11, pp. 555–563. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.555 (In Russian).
16. Malkin A.Ya., Kulichikhin S.G. Reologia v processah obrazovaniya i prevrasheniya polimerov [Rheology in the processes of polymer formation and transformation]. Moscow: Khimiya. 1985. 240 p.
17. Savada Kh. Termodinamika polimerizacii [Thermodynamics of polymerization]. Moscow: Khimiya. 1979. 312 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BOLOTOV Alexander Nikolaevich – Academic Secretary of the Academic Council of Tver State Technical University, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Applied Physics of the Department of Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: alnikbltov@rambler.ru

NOVIKOVA Olga Olegovna – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of the Applied Physics, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: onvk@mail.ru

NOVIKOV Artem Vladislavovich – Master of the Department of Structures and Constructions, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: artmnv75@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Bolotov A.N., Novikova O.O., Novikov A.V. Determination of the energy of activation of the synthesis of magnetic lubricant nanooils based on viscosimetric studies // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 2 (10), pp. 85–95.

УДК 541.6

**УФ-СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ
ЛАНДЫША МАЙСКОГО**

М.Г. Виноградова

Тверской государственный университет (г. Тверь)

© Виноградова М.Г., 2021

Аннотация. Обсуждена возможность установления химического состава ландыша майского с помощью ультрафиолетовой спектроскопии. Проведен анализ растительного сырья популяций ландыша майского в составе фитоценозов лесов Торжокского района Тверской области. Идентифицированы фенольные соединения, входящие в состав изучаемых растений. Определена структура исследуемых флавоноидов.

Ключевые слова: УФ-спектроскопия, ландыш майский, флавоноидные соединения.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-95-102

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возрастает потребность здравоохранения, химико-фармацевтической промышленности в лекарственном растительном сырье для увеличения выпуска существующих препаратов, создания и внедрения новых [1–7].

Одними из самых эффективных средств, регулирующих работу сердца, являются сердечные гликозиды. Вещества этой группы есть в различных растениях, в том числе и в ландыше майском. Гликозиды ландыша нестойки и не накапливаются в организме.

Препараты из этого растения применяют при неврозах и пороках сердца, кардиосклерозе и сердечной недостаточности. Важно изыскание новых сырьевых источников и анализ состава растительного сырья ландыша майского для оценки его качества.

Цель работы – изучение химического состава листьев ландыша майского в фитоценозах лесов Торжокского района Тверской области.

Объект исследования: растение семейства спаржевых (*Asparagaceae*) – ландыш майский (*Convallaria majalis* L., 1753).

Основная задача – идентифицировать фенольные соединения в составе сырья ландыша майского.

Методами идентификации состава и определения чистоты лекарственных растений являются [8–12] метод инфракрасной (ИК) спектроскопии, метод ультрафиолетовой (УФ) спектроскопии, атомно-эмиссионный спектральный анализ, растровая электронная микроскопия. В работе используется метод УФ-спектроскопии.

Ранее нами были проведены исследования химического состава травы ландыша майского методом Фурье-ИК-спектроскопии [13, 14], а также с помощью метода растровой электронной микроскопии была дана морфологическая оценка вегетативных органов ландыша майского [15].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование популяций ландыша майского проводилось в южной части Торжокского района Тверской области, в деревнях Воропуни и Подолы (в трех биотопах – березняке разнотравном, находящемся на окраине деревни Воропуни, на всхолмлении у смешанного леса в деревне Подолы и на окраине дороги в деревне Воропуни в смешанном лесу с преобладанием ели обыкновенной).

Идентификация фенольных соединений в составе сырья ландыша майского проводилась методом УФ-спектроскопии.

Поглощение света веществом в ультрафиолетовой и видимой областях спектра зависит от электронной структуры молекулы. При этом существенными элементами, обуславливающими наличие электронных спектров, являются кратная связь и неподеленная электронная пара.

Природа полос поглощения в УФ- и видимых областях спектра одинакова и связана в основном с числом и расположением электронов в поглощающих молекулах и ионах. Определенные полосы в спектре могут указывать на наличие в структуре соединения тех или иных функциональных групп (хромофоров). Поэтому спектры веществ, содержащих, например, фенильный радикал (эфедрин, димедрол, атропин), схожи.

Однозначный вывод о структуре соединения сделать сложно, так как обычно интерпретация спектра затруднена присутствием в молекуле более чем одного хромофора, заместителей, влиянием растворителя, поведением вещества в растворе, наличием геометрической изомерии. Эти факторы могут вызвать эффекты изменения интенсивности положения максимума поглощения. Для характеристики изменения интенсивности поглощения применяют такие понятия, как «гиперхромный эффект» (усиление интенсивности) и «гипсохромный эффект» (ослабление интенсивности) [8, 12].

Для анализа содержания фенольных соединений использовались водный и спиртовой экстракты из растительного сырья. Листья и цветки ландыша были высушены по правилам заготовки лекарственного сырья и измельчены в лаборатории спектроскопии кафедры физической химии Тверского государственного университета. Водный раствор

готовился в соотношении 1 : 100 (к 100 мг измельченного сырья добавляли 9,9 мл воды), а спиртовой – в соотношении 1 : 1000 (к 5 мг сырья добавляли 4,995 мл 70 % этилового спирта). Экстракты подвергли нагреву на водяной бане в течение 30–40 мин и настаивали 24 ч в темном месте при комнатной температуре, процеживали через фильтровальную бумагу и центрифугировали. Полученный экстракт использовали для проведения анализа. Образцы разбавляли до требуемой концентрации. С помощью УФ-спектрофотометра Thermo Scientific Evolution Array были сняты спектры для всех приготовленных экстрактов на фоне 70%-го этилового спирта и воды, а в программе OriginPro 8.6 были получены графические результаты исследования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

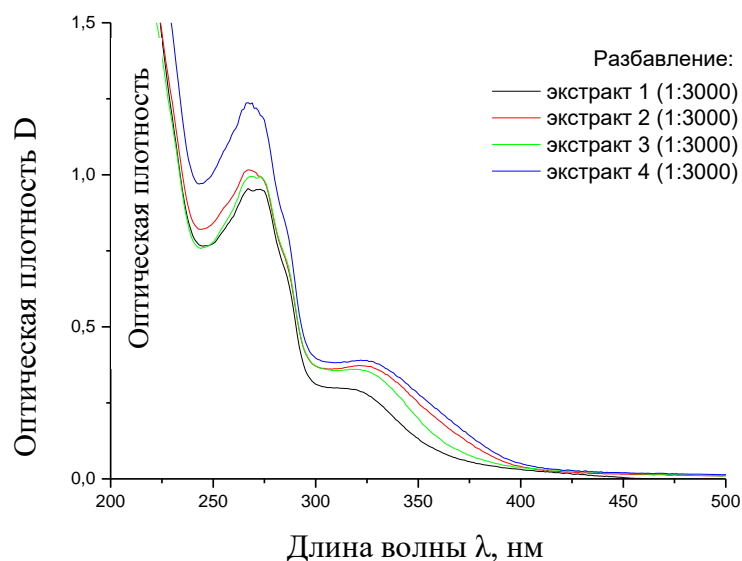
Для идентификации фенольных соединений очень часто пользуются спектрами их поглощения в УФ-области (220–400 нм).

Литературные данные о химическом составе ландыша майского, таблицы характеристических полос поглощения позволили наиболее точно изложить информацию о его строении.

Анализ водных и спиртовых растворов показал идентичные результаты полученных ранее графиков (рисунок). Исключением явилось наличие полос поглощения на спектрах спиртовых растворов в области 412 нм, но они не дали информативных данных по фенолам, так как обнаружили зеленый пигмент хлоропластов растений – хлорофилл.

Во всех спектрах жидких экстрактов травы ландыша майского наблюдаются два максимума поглощения – 267 и 320 нм (рисунок).

Максимумы поглощения основных групп фенольных соединений в УФ- и видимой областях представлены в таблице. В скобках указаны относительные размеры дополнительных максимумов поглощения.



УФ-спектры разбавленных водных экстрактов
на основе травы ландыша майского: экстракт 1 – окраина дороги в смешанном лесу;
экстракт 2 – всхолмление у смешанного леса; экстракт 3 – березняк разнотравный;
экстракт 4 – аптечная форма

Максимумы поглощения основных групп фенольных соединений
в УФ- и видимой областях

Группа соединений	Основной максимум, нм	Дополнительный максимум, нм
Простые фенолы	265–275	–
Оксибензойные кислоты	235–270, 290–305	300–350
Оксикоричные кислоты	230–240, 290–320	–
Кумарины	220–230, 310–350	≈ 260 (30 %); ≈ 300 (30 %)
Катехины	270–280	–
Лейкоантоцианидины	270–280	–
Халконы	365–390	240–280 (30 %)
Антоцианы	475–560	≈ 275–280 (55 %)
Флаваноны	275–290, 290–330	310–330 (30 %)
Ауроны	390–430	240–270 (32 %)
Флавоны	250–270, 310–350	–
Флавонолы	250–270; 350–390	≈ 300 (40 %)
Изофлавоны	255–265	310–330 (25 %)
Ксантоны	230–245, 250–265	305–330 (50 %), 340–400 (30 %)

Как видно из таблицы, отдельные группы фенольных соединений заметно отличаются друг от друга по своим спектральным характеристикам. Обычно в УФ-спектрах длинноволновый максимум (300–380 нм) связывают с поглощением кольца В, а коротковолновый (240–280 нм) – кольца А.

Таким образом, на основе данных таблицы можно сделать вывод, что идентифицированные нами фенольные соединения относятся к флавонам и кумаринам.

Флавоны представлены кверцетином, кемпферолом, гиперозидом, кверцимеритрином, биокверцетином, изобиокверцетином, трифолином, биоробином и изобиоробином.

Состав обнаруженной группы кверцетина: кверцетин, гиперозид, кверцимеритрин, биокверцетин, изобиокверцетин.

Группа кемпферола содержит кемпферол, трифолин, биоробин, изобиоробин.

Идентифицированные нами производные кумаринов представлены оксикумаринами: умбеллифероном ($C_9H_6O_3$) и скополетином ($C_{10}H_8O_4$).

Гликозиды изобиокверцетин и изобиоробин при кислотном гидролизе серной кислотой расщепляются на кверцетин и кемпферол и сахарные компоненты.

Кверцетин имеет свободные оксигруппы в 3,5,7,3',4'-, а кемпферон – в 3,5,7,4'-положениях флавоноидного ядра. В продуктах гидролиза метильных производных изобиокверцетина и изобиоробина хроматографией на бумаге обнаруживается 2,3,4,-три-0-метил-4-рамноза и 3,4,6-три-0-метил-D-галактоза. По результатам метилирования можно заключить, что сахара присоединены между собой связью 1→2 (это характерная особенность данных гликозидов).

В продуктах гидролиза изобиокверцетина обнаруживается гиперозид, а изобиоробина – трифолин. Конечным сахаром в них является L-рамноза.

Кверцетин выглядит на хроматограммах в УФ-свете как темное пятно, что говорит о замещении третьего положения кемпферола, и гидролизуется кислотами до кемпферола, D-галактозы и L-рамнозы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Идентифицированные флавоноидные соединения ландыша майского образованы флавонолами и кумаринами (вошли в диапазон поглощений 250–270 и 310–350 нм соответственно, так как наблюдались два максимума поглощения – 267 и 320 нм). Флавонолы представлены двумя агликонами (кверцетином, кемпферолом) и семью их гликозидами (гиперозидом, кверцимеритрином, биокверцетином, изобиокверцетином, трифолином, биоробином, изобиоробином). Производные кумаринов представлены оксикумаринами: умбеллифероном и скополетином.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брем А. Жизнь растений. Новейшая ботаническая энциклопедия. М.: Эксмо. 2010. 876 с.
2. Крылова И.Л. О фитоценоотическом оптимуме и его критериях // *Популяционная экология растений: Материалы конференции*. М.: Наука. 1987. С. 14–18.

3. Самылина И.А. Пути использования лекарственного растительного сырья и его стандартизация. М.: Фармация. 2004. 56 с.
4. Уразалиев Р.А. Проблемы сохранения биоразнообразия лекарственной флоры, ее переработка и получение фитопрепаратов // *Переработка лекарственного сырья и производство фитопрепаратов для медицины и сельского хозяйства: Материалы международной научно-практической конференции.* Алматы. 1996. С. 41.
5. Запроматов М.Н. Фенольные соединения. Распространение, метаболизм и функции в растениях. М.: Наука. 1993. 272 с.
6. Ладыгина Е.Я. Химический анализ лекарственных растений: учеб. пособие. М.: Высшая школа. 1983. 176 с.
7. Химический анализ лекарственных растений / под ред. Н.И. Гринкевич, Л.Н. Сафронич. М.: Высшая школа. 1983. 176 с.
8. Пахомов П.М. Основы физики и химии полимеров: учеб. пособие. Тверь: ТвГУ. 2010. 164 с.
9. Мельникова Н.Б., Зимнякова О.Е., Пожидаев В.М., Саликова Т.В., Пегова И.А., Гусихина М.С. Электронная спектроскопия в фармацевтическом анализе: учеб. пособие. Новочеркасск: НГМА. 2006. 37 с.
10. Cozzolino D. Use of infrared spectroscopy for in-field measurement and pheno-typing of plant properties: instrumentation, data analysis, and examples // *Appl. Spectrosc. Rev.* 2014. Vol. 49. P. 564–584.
11. Шагина Н.А., Азимова Ф.Ш., Мустафаева А.Т. Спектрофотометрическое исследование растительного экстракта зверобоя // *Научно-методический электронный журнал «Концепт».* 2015. Т. 13. С. 1301–1305.
12. Якимова Л.С. Метод УФ-спектроскопии и его применение в органической и физической химии. Казань: Казан. ун-т. 2015. 19 с.
13. Кучеренко М.А., Виноградова М.Г. Анализ химического состава листьев *CONVALLARIA MAJALIS* L. в фитоценозах с различной антропогенной нагрузкой с использованием Фурье-ИК-спектроскопии // *Вестник Тверского государственного университета. Серия «Химия».* 2017. № 4. С. 30–35.
14. Виноградова М.Г., Кучеренко М.А. Физико-химические методы исследования лекарственного сырья // *Качество и экологическая безопасность пищевых продуктов и производств: Материалы Международной научной конференции с элементами научной школы для молодежи, 15–18 марта 2017 года, Тверь.* Тверь: ТвГУ. 2017. С. 73–74.
15. Виноградова М.Г. Методы ИК-спектроскопии и растровой электронной микроскопии в исследовании качества лекарственного сырья // *Качество и экологическая безопасность пищевых продуктов и производств: Материалы Международной научной конференции с элементами научной школы для молодежи, 8–10 апреля 2020 года, Тверь.* Тверь: ТвГУ. 2020. С. 9–13.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ВИНОГРАДОВА Марина Геннадьевна – д-р хим. наук, профессор, профессор кафедры физической химии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», 170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33. E-mail: Vinogradova.MG@tversu.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Виноградова М.Г. УФ-спектральный анализ растительного сырья ландыша майского // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 2 (10). С. 95–102.

**UV-SPECTRAL ANALYSIS
OF PLANT RAW MATERIALS MAY LILY OF THE VALLEY**

M.G. Vinogradova

Tver State University (Tver)

Abstract. The possibility of determining the chemical composition of the May lily of the valley by ultraviolet spectroscopy is discussed. The analysis of plant materials of populations of Lily of the valley in the composition of forest phytocenoses of torzhoksky district, Tver region. The phenolic compounds included in the studied plants were identified. The structure of the studied flavonoids is determined

Keywords: UV-spectroscopy, May lily of the valley, flavonoid compounds.

REFERENCES

1. Brem A. Zhizn' rastenij. Novejshaya botanicheskaya enciklopediya [The life of plants. The newest botanical encyclopedia]. Moscow: Eksmo. 2010. 876 p.
2. Krylova I.L. About the phytocenotic optimum and its criteria. *Populyacionnaya ekologiya rastenij: Materialy konferencii*. Moscow: Nauka. 1987, pp. 14–18. (In Russian).
3. Samylina I.A. Puti ispol'zovaniya lekarstvennogo rastitel'nogo syr'ya i ego standartizaciya [Ways of using medicinal plant raw materials and its standardization]. Moscow: Farmaciya. 2004. 56 p.
4. Urazaliev R.A. Problems of preserving the biodiversity of medicinal flora, its processing and production of phytopreparations. *Processing of medicinal raw materials and production of phytopreparations for medicine and agriculture: Mater. international scientific and practical conference*. Almaty. 1996. p. 41. (In Russian).
5. Zaprometov M.N. Fenol'nye soedineniya. Rasprostranenie, metabolism i funkcii v rasteniyah [Phenolic compounds. Distribution, metabolism and functions in plants]. Moscow: Nauka. 1993. 272 p.
6. Ladygina E.Ya. Himicheskij analiz lekarstvennyh rastenij [Chemical analysis of medicinal plants: textbook manual]. Moscow: Vysshaya shkola. 1983. 176 p.
7. Himicheskij analiz lekarstvennyh rastenij [Chemical analysis of medicinal plants] / ed. by N.I. Grinkevich, L.N. Safronich. Moscow: Vysshaya shkola. 1983. 176 p.

8. Pakhomov P.M. Osnovy fiziki i himii polimerov: ucheb. posobie [Fundamentals of polymer physics and chemistry: a textbook]. Tver: TSU. 2010. 164 p.
9. Melnikova N.B., Zimnyakova O.E., Pozhidaev V.M., Salikova T.V., Pegova I.A., Gushina M.S. Elektronnaya spektroskopiya v farmaceuticheskom analize: ucheb. posobie [Electron spectroscopy in pharmaceutical analysis: a textbook] Novocherkassk: NGMA. 2006. 37 p.
10. Cozzolino D. Use of infrared spectroscopy for in-field measurement and pheno-typing of plant properties: instrumentation, data analysis, and examples. *Pap. Spectrosc. Rev.* 2014. Vol. 49, pp. 564–584.
11. Shagina N.A., Azimova F.Sh., Mustafaeva A.T. Spectrophotometric study of the plant extract of St. John's wort. *Nauchno-metodicheskij elektronnyj zhurnal «Koncept».* 2015. Vol. 13, pp. 1301–1305. (In Russian).
12. Yakimova L.S. UF-spektroskopii i ego primenenie v organicheskoy i fizicheskoy himii [Method of UV spectroscopy and its application in organic and physical chemistry]. Kazan: Kazan. univ. 2015. 19 p.
13. Kucherenko M.A., Vinogradova M.G. Analysis of the chemical composition of leaves of CONVALLARIA MAJALIS L. in phytocenoses with different anthropogenic loads using Fourier-IR spectroscopy. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Himiya». Chemiae series.* 2017. No. 4, pp. 30–35. (In Russian).
14. Vinogradova M.G., Kucherenko M.A. Physico-chemical methods of research of medicinal raw materials. *Quality and environmental safety of food products and industries: Materials of the International scientific conference with elements of the scientific school for young people, March 15–18, 2017, Tver.* Tver: TvSU. 2017, pp 73–74. (In Russian).
15. Vinogradova M.G. Methods of IR spectroscopy and scanning electron microscopy in the study of the quality of medicinal raw materials. *Quality and environmental safety of food products and industries: Materials of the International scientific conference with elements of the scientific school for young people, 8–10 April 2020, Tver.* Tver: TvSU. 2020, pp. 9–13. (In Russian).

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

VINOGRADOVA Marina Gennadievna – Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor of Physical Chemistry, Tver State University, 33, Zhelyabova st., Tver, 170100, Russia. E-mail: Vinogradova.MG@tversu.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Vinogradova M.G. UV-spectral analysis of plant raw materials may lily of the valley // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 2 (10), pp. 95–102.

УДК 331.43

СНИЖЕНИЕ ВРЕДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ПОРОШКОВОЙ ПОКРАСКЕ***В.В. Лебедев, Н.Г. Марилов****Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Лебедев В.В., Марилов Н.Г., 2021

Аннотация. Отмечено, что для покраски металлических изделий сегодня все чаще используют порошковый способ. Описаны достоинства данной технологии (получаемое лакокрасочное покрытие долговечно, прочно и при этом достаточно экономично). Отдельно указано, что, пользуясь порошковой краской, можно получить различные декоративные экологически чистые покрытия. Даны общий вид технологической линии подготовки и нанесения порошкового полимерного покрытия, принципиальная схема распыления и осаждения заряженных частиц на детали. Перечислены различные вредные и опасные производственные факторы, воздействующие на работника при организации и проведении окрасочных работ. Описан построенный опытный образец аппарата встречных закрученных потоков, после испытаний которого были получены положительные результаты и принято решение внедрить данное устройство на ООО «ТВЗ» (г. Торжок).

Ключевые слова: порошковая покраска, порошковый материал, средства защиты, индивидуальная защита, производственный фактор.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-103-109**ВВЕДЕНИЕ**

Порошковая покраска – это экономичная технология. Минимальное количество операций, использование компактного оборудования, а также высокая скорость полимеризации позволяют уменьшить расходы краски. Порошковая краска стала крайне популярным в строительстве средством для окрашивания металлических изделий, поскольку именно они нуждаются в качественной защите от воздействия различных факторов. Порошковая краска имеет повышенную устойчивость к негативному влиянию атмосферных явлений, поэтому применяется при покраске фасадных конструкций. Очень часто рассматриваемый материал используется для обработки алюминиевых изделий, но в этом случае важно правильно выбрать краску и выполнить подготовку поверхности. Указанная краска часто используется для качественного покрытия декоративных изделий, поскольку позволяет эффективно скрыть недостатки поверхности и обладает высокими эстетическими качествами.

Порошковая краска применяется в строительстве при производстве стальных дверей (придает изделиям презентабельный внешний вид и скрывает некоторые недостатки, появившиеся в процессе изготовления). Особое внимание стоит уделить процессу подготовки поверхности. Не следует забывать о том, что порошковая краска является твердым продуктом, который не содержит растворителей. Именно поэтому ее отличает достаточно высокий коэффициент использования (до 98 %).

Порошковые краски представляют собой твердые дисперсные композиции. В состав входят пленкообразователи, отвердители, наполнители и пигментные добавки.

Готовые краски имеют широкий полидисперсный гранулометрический состав, размер гранул составляет от 5 до 100 мкм.

Окрашивание порошковыми лакокрасочными материалами представляет собой одну из наиболее совершенных технологий получения покрытий. Возникновение этой технологии – результат длительного развития и эволюции методов, связанных с нанесением жидких лакокрасочных материалов и напылением металлов. Его становлению способствовали все возрастающие требования по охране окружающей среды, экономические соображения, стремление к повышению качества покрытий. В наиболее рациональном виде новый процесс получения покрытий оформился в 60-е гг. XX в. С этого времени началось стремительное развитие порошковых красок (исходных материалов для получения покрытий) и технологии их нанесения. В настоящее время практически нет отрасли промышленности, где бы не использовалась эта технология; все шире она внедряется и в строительную индустрию. С развитием данной технологии появляется все больший спрос на коллективные и индивидуальные средства защиты от воздействия вредных веществ, выделяемых при порошковой покраске. Для снижения запыленности и рекуперации порошкового материала предложена схема соединения окрасочной кабины и аппарата встречных закрученных потоков (АВЗП). Аппарат встречных закрученных потоков – эффективное средство коллективной защиты операторов окрасочных камер. Новизна рассматриваемого АВЗП заключается в отсутствии рукавного фильтра, являющегося расходным материалом в подобных установках (он быстро засоряется).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Распыление и осаждение порошкового материала происходит в окрасочной кабине, в результате чего образуется наэлектризованное пылевидное облако, подача порошка – с помощью компрессора. Технологическая линия подготовки и нанесения порошкового покрытия представлена на рис. 1.

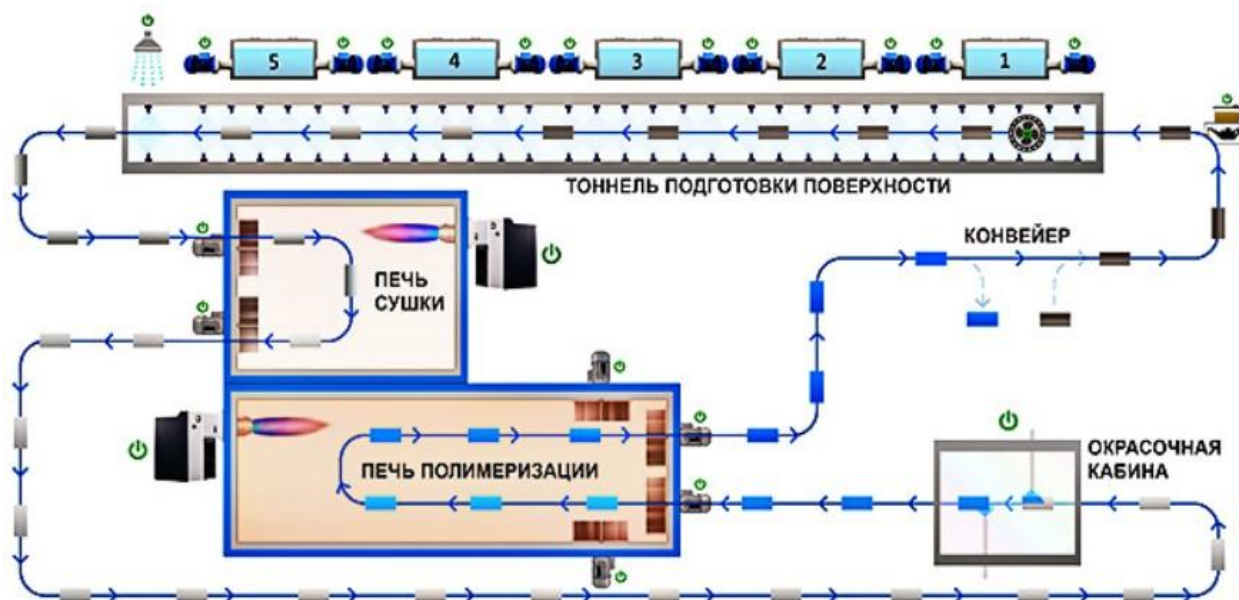


Рис. 1. Технологическая линия подготовки и нанесения порошкового полимерного покрытия

Прилипание частиц к окрашиваемой поверхности происходит из-за их электризации: ими приобретает заряд, отличный от того, каким обладает поверхность. Далее все происходит в соответствии с известным законом Кулона о притяжении разноименных электрических зарядов. Сила электризации определяет прочность сцепления. Приобретение изначально электрически нейтральными частицами положительного или отрицательного заряда может происходить двумя методами:

1) электростатическим, когда частица порошка заряжается от внешнего источника, поэтому порошковые пистолеты, реализующие этот принцип, называются электростатическими;

2) от кинетической энергии трения между смежными частицами, которые с большой скоростью вылетают из сопла красящего пистолета. Поскольку в этом случае используется трибостатический эффект, то и пистолеты получили такое же название (трибостатические).

Принципиальная схема распыления и осаждения заряженных частиц на детали показана на рис. 2.

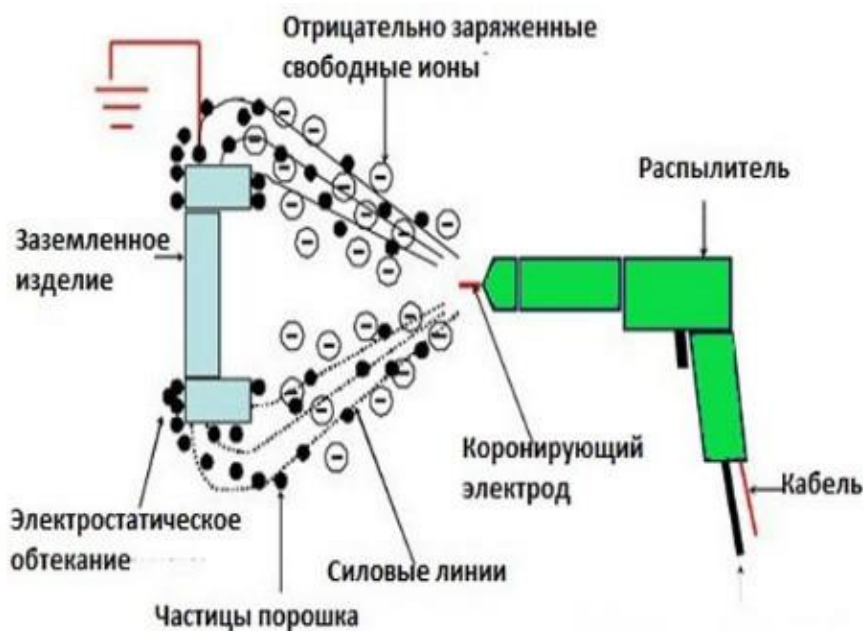


Рис. 2. Принципиальная схема нанесения порошкового материала

При организации и проведении окрасочных работ на работника воздействуют различные вредные и опасные производственные факторы:

запыленность рабочей зоны частицами порошкового материала;

повышенное содержание в воздухе рабочей зоны вредных химических веществ, входящих в состав красок. Степень воздействия химического фактора на организм определяется классом опасности веществ, входящих в порошковые краски. Концентрации вредных химических веществ и соединений, поступающих в воздух рабочей зоны, не должны превышать допустимые нормы, установленные в Постановлении Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 13.02.2018 № 25 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны» [2];

напряженность электростатического поля при нанесении порошковых красок электростатическими методами и обработке окрашиваемых поверхностей. Допустимый уровень напряженности электростатического поля определяется в зависимости от времени его воздействия на работника согласно СанПиН 123685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» [1].

Порошки состоят из абразивных частиц и могут вызвать раздражение кожи либо глаз при трении. Использование сжатого воздуха для удаления порошка не рекомендуется, поскольку это может привести к попаданию абразивных частиц на кожу и в глаза. Рабочие должны носить защитную спецодежду и очки для исключения контакта. Полный вариант состоит из комбинезона, перчаток, респиратора, головного убора и защитных очков. «Облегченный» вариант – перчатки, респиратор и защитные очки. Все это оснащение необходимо для полноценной защиты организма (в первую очередь органов дыхания, глаз и кожи рук). Дело в том, что постоянное вдыхание малярных взвесей приводит к серьезным заболеваниям легочной системы. Необходимый набор средств индивидуальной защиты маляра представлен на рис. 3.



Рис. 3. Средства индивидуальной защиты маляра

Комбинезоны для маляров бывают одноразовыми и многоразовыми. Первый, как следует из названия, рассчитан на единичное использование и обычно производится из тонкого полиэтилена. Многоразовый комбинезон изготавливается из вискозы или нейлона. Он не имеет ворса и не создает статического эффекта. Кроме того, очень прочен (нередко армирован карбоновой нитью) и стоек к разного рода растворителям и высоким температурам.

Малярные многоразовые перчатки изготавливают из винила или нитрила, одноразовые – из латекса. Внутренняя их часть обычно посыпана тальком. Могут также использоваться перчатки из трикотажных материалов.

Респираторы – обязательный элемент защиты маляра. Нередко его заменяют одноразовой маской, однако это не совсем правильно. Дело в том, что маска предохраняет органы дыхания только от аэрозольных взвесей и не препятствует вдыханию паров растворителей, красок и т. д. Оптимальный вариант – многоразовый респиратор с возможностью замены угольных фильтров. Часто также применяют специализированные полумаски плотного прилегания, которые можно дополнять фильтрами разной степени очистки.

Защитные очки необходимы для защиты глаз от брызг краски или побелки, мелких взвешенных частиц и т. д. Защитные очки также бывают многоразовыми и одноразовыми. Изготавливаться они должны из прочного пластика, который дает полноценный обзор и не мутнеет со временем. Обязательны вентиляционные отверстия, предотвращающие запотевание очков. Оправа очков не должна препятствовать обзору. При необходимости их вполне можно использовать поверх обычных офтальмологических очков. Нередко защитные очки объединяют с респиратором. Такая маска очень удобна, она обеспечивает полноценную защиту и глаз, и легких. Выпускаются маски-колпаки, полностью закрывающие всю голову.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По чертежам указанной АВЗП был построен опытный образец, после испытаний которого были получены положительные результаты. На основе этого было принято решение внедрить данное устройство на ООО «ТВЗ» (г. Торжок). Схема соединения окрасочной кабины и АВЗП представлена на рис. 4.

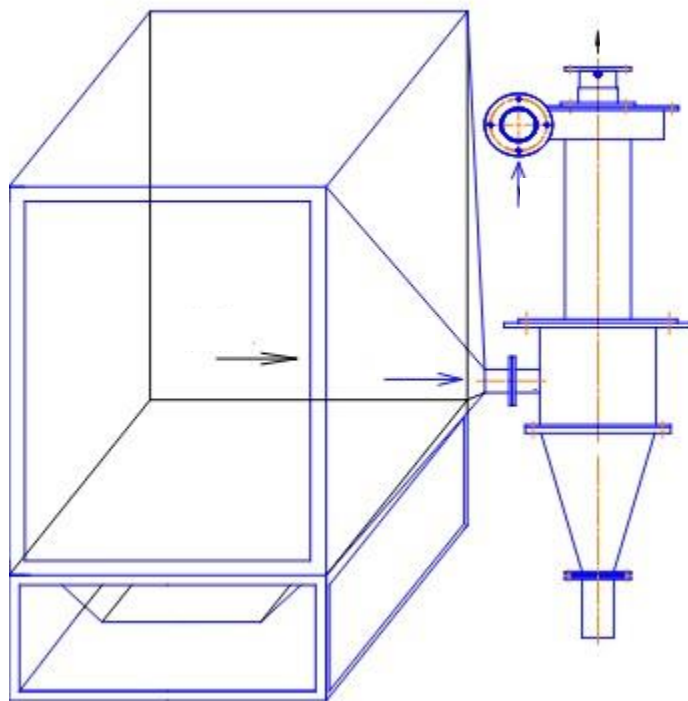


Рис. 4. Окрасочная кабина с АВЗП

Результаты эксплуатации доказали правильность методики расчета АВЗП и выбранной методики определения скоростных характеристик воздушного потока в камерах напыления. Аппарат встречных закрученных потоков является эффективным средством коллективной защиты операторов окрасочных камер. Для тупиковых камер скорость воздушного потока рассчитывалась как скорость витания частиц среднего размера (до 60 мкм). Такая скорость необходима для исключения сдува порошка с заготовок и уменьшения мощности вентилятора. В проходных камерах напыления размер частиц принимался максимальным (до 100 мкм) для снижения потерь порошковой краски в виде выпадения на напольное покрытие. Не стоит также забывать про средства индивидуальной защиты, которые минимизируют воздействие вредных факторов при правильном использовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты эксплуатации АВЗП доказали его эффективность как пылеуловителя. Концентрация мелкодисперсных частиц менее 5 мкм была на уровне 2,46–4 мг/м³, что соответствует 99 % очистки. Частицы более 5 мкм во всех случаях были отделены. Рекуперат после аппарата не требует последующего просеивания и может использоваться для повторного покрытия, а в случае необходимости возможна сушка вместе с сепарацией. Аппарат встречных закрученных потоков можно применять как промышленный пылесос для чистки камеры напыления (собирает частицы размером 60–100 мкм, осевшие на дно камеры). Вторичный поток аппарата может использоваться для обеспыливания рабочей зоны оператора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПиН 123685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. URL: <https://docsntdru/document/573500115> (дата обращения: 25.06.2021).
2. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны: постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 13.02.2018 № 25. URL: <https://basegarantru/71929532/> (дата обращения: 06.07.2021).
3. Вишняков Я.Д. Безопасность жизнедеятельности. М.: Юрайт. 2015. 543 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЛЕБЕДЕВ Валерий Валентинович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности и экологии, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: le-va454919@rambler.ru
МАРИЛОВ Никита Геннадьевич – студент, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: marilov_nikitka@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Лебедев В.В., Марилов Н.Г. Снижение вредного воздействия при порошковой покраске // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2021. № 2 (10). С. 103–109.

REDUCED EXPOSURE TO POWDER COATING

V.V. Lebedev, N.G. Marilov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. It is noted that the powder method is increasingly used for painting metal products today. The advantages of this technology are described (the resulting paintwork is durable, durable and at the same time quite economical). It is separately indicated that using powder paint, it is possible to obtain various decorative environmentally friendly coatings. The general view of the technological line of preparation and application of powder polymer coating, the schematic diagram of spraying and deposition of charged particles on the parts are given. Various harmful and dangerous production factors affecting the employee during the organization and conduct of painting works are listed. The built prototype of the counter swirling flows apparatus is described, after testing which positive results were obtained and a decision was made to implement this device at TVZ LLC (Torzhok).

Keywords: powder painting, powder material, personal protective equipment, production factors.

REFERENCES

1. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness to humans of environmental factors. URL: <https://docsntdru/document/573500115> (date of access: 25.06.2021).
2. Maximum permissible concentration (MPC) of harmful substances in the air of the working area: resolution of the Chief state sanitary doctor of the Russian Federation of from 13.02.2018 No. 25. URL: <https://basegarantru/71929532/> (date of access: 06.07.2021).
3. Vishnyakov Y.D. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti [Life safety]. Moscow: Yurajt, 2015. 543 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

LEBEDEV Valery Valentinovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Life Safety and Ecology, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: le-va454919@rambler.ru

MARILOV Nikita Gennadievich – Student, Tver State Technical University, 22, embankment of Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: marilov_nikitka@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Lebedev V.V., Marilov N.G. Reduced exposure to powder coating // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2021. No. 2 (10), pp. 103–109.

ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал
№ 2 (10), 2021

Редактор Ю.А. Якушева
Корректор С.В. Борисов