

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

**ВЕСТНИК
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

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

Научный рецензируемый журнал

№ 3 (23), 2024

Тверь 2024

Вестник Тверского государственного технического университета: научный журнал. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». Тверь: Тверской государственный технический университет, 2024. № 3 (23). 102 с.

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

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

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

ISSN 2686-794X (онлайн)

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Эквист К.А., Белов В.В.</i> Эффективные фибробетонные тонкостенные облицовочные изделия	5
<i>Курятников Ю.Ю.</i> Дефекты железобетонных изделий при нарушении норм строительства и эксплуатации зданий и сооружений	12
<i>Магдеев А.Ш., Левиков А.В.</i> Повышение эффективности организации парковочного пространства за счет внедрения многоуровневых автостоянок на примере г. Твери	20
<i>Москвина Ю.Н., Крутских А.В.</i> Применение наземного лазерного сканирования в строительной отрасли	26
<i>Павлов В.Д.</i> Усиление балки гидравликой.....	30
<i>Петропавловская В.Б., Козлова К.А., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б.</i> Синтез фосфогипсовых композиций с алюмосиликатной наносферой.....	36

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

<i>Макаров А.Н.</i> Расчет потоков теплового излучения дуг по поверхности ванны и стен высокоомощных электродуговых сталеплавильных печей. Часть II. Распределение тепловых потоков излучения дуг по поверхности стен...	43
<i>Окунева В.В., Зубков С.Н.</i> Диэлектрические перчатки как средство индивидуальной защиты: статистика дефектов и процедуры проверки.....	52
<i>Попов И.П.</i> Приоритет электродинамики над механикой на примере второго закона Ньютона.....	62

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

<i>Белов В.В.</i> Определение реологических свойств твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, с помощью конусной пенетрации. Часть 2. Приборное обеспечение.....	70
<i>Горцевич С.Л., Соболев А.Е., Пичугина А.И., Эсауленко М.А.</i> Исследование окислительного растворения серебра флуориметрическим методом при образовании разнолигандных комплексов с имидазолом.....	78
<i>Старовойтов А.В., Горцевич С.Л., Соболев А.Е., Долуда В.Ю.</i> Оценка прочности гетеролигандных комплексов золота по величине потенциала золотого электрода.....	84
<i>Туманов Г.А., Старовойтов А.В., Лагусева Е.И., Чалов К.В., Пичугина А.И., Долуда В.Ю.</i> Аналитические особенности определения устойчивости пен.....	89
<i>Туманов Г.А., Старовойтов А.В., Лагусева Е.И., Чалов К.В., Старовойтова Н.Ю., Долуда В.Ю.</i> Экспериментальное определение устойчивости пен.....	95

CONTENTS

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Equist K.A., Belov V.V.</i> Effective fiber-concrete thin-walled cladding products	5
<i>Kuryatnikov Yu.Yu.</i> Defects in reinforced concrete products due to violation of construction and operation standards for buildings and structures	12
<i>Magdeev A.Sh., Levikov A.V.</i> Improving the efficiency of parking space organization through the introduction of multi-level parking lots on the example of the city of Tver	20
<i>Moskvina Yu.N., Krutskikh A.V.</i> Application of ground-based laser scanning in the construction industry.....	26
<i>Pavlov V.D.</i> Strengthening the beam with hydraulics.....	30
<i>Petropavlovskaya V.B., Kozlova K.A., Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B.</i> Synthesis of phosphogypsum compositions with aluminosilicate nanosphere.....	36

ELECTRICAL ENGINEERING

<i>Makarov A.N.</i> Calculation of thermal radiation fluxes of arcs on the surface of the bath and walls of high-power electric arc steel-melting furnaces. Part II. Distribution of heat fluxes of arc radiation along wall surfaces	43
<i>Okuneva V.V., Zubkov S.N.</i> Dielectric gloves as a means of personal protection: defect statistics and verification procedures.....	52
<i>Popov I.P.</i> Priority of electrodynamics over mechanics using the example of Newton's second law	62

CHEMICAL TECHNOLOGY

<i>Belov V.V.</i> Determination of rheological properties of solid dispersed systems used in the production of building materials applying cone penetration technique. Part 2. Instrumentation.....	70
<i>Gortsevich S.L., Sobolev A.E., Pichugina A.I., Yesaulenko M.A.</i> Investigation of the oxidative dissolution of silver by the fluorimetric method in the formation of multi-ligand complexes with imidazole.....	78
<i>Starovoitov A.V., Gortsevich S.L., Sobolev A.E., Doluda V.Yu.</i> Assessment of the strength of heteroligand gold complexes by the potential of the gold electrode.....	84
<i>Tumanov G.A., Starovoitov A.V., Laguseva E.I., Chalov K.V., Pichugina A.I., Doluda V.Yu.</i> Analytical features of study of foam stability.....	89
<i>Tumanov G.A., Starovoitov A.V., Laguseva E.I., Chalov K.V., Starovoitova N.Yu., Doluda V.Yu.</i> Experimental study of foam stability.....	95

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.328.5

ЭФФЕКТИВНЫЕ ФИБРОБЕТОННЫЕ ТОНКОСТЕННЫЕ ОБЛИЦОВОЧНЫЕ ИЗДЕЛИЯ

*К.А. Эквист, В.В. Белов**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Эквист К.А., Белов В.В., 2024

Аннотация. В статье приведен обзор применения базальтового волокна (фибры) и других дополнительных составляющих (например, микрокальцита) для улучшения строительно-технических свойств бетона. Анализ источников показал, что использование базальтового волокна в качестве армирующего компонента положительно влияет на ряд свойств материала, таких как прочность на изгиб, прочность на сжатие и морозостойкость, а микрокальцит позволяет уменьшить пористость материала и увеличить плотность.

Ключевые слова: базальтовая фибра, микроармирующий компонент, фибробетон, микрокальцит.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-5-12

Актуальность настоящей работы обуславливается тем, что бетонные тонкостенные облицовочные изделия становятся все более популярными в современном строительстве, а следовательно, возникает необходимость создания состава, изделия из которого, с одной стороны, должны выглядеть эстетично, а с другой – обладать рядом необходимых строительно-технических свойств. Готовые изделия должны отвечать жестким требованиям к прочности, трещиностойкости, морозостойкости и коррозионной стойкости.

Указанные сложные задачи требуют новых, прогрессивных решений. Последние стали возможны при вводе в состав бетона дисперсных волокон. Для армирования используют различные виды волокон, имеющих металлическое, неметаллическое, органическое и природное происхождение. Названия такому бетону дают в зависимости от волокон, используемых в его составе (фиброармированный бетон, сталефибробетон, стеклофибробетон и т.д.). Номенклатура названных волокон чрезвычайно обширна. Здесь могут применяться дефицитные волокна, такие как кремний, углерод, вольфрам, а также довольно распространенные в промышленности базальт, стекло, сталь, полимеры. Несомненно, для армирования можно использовать и природные древесные волокна, но в отношении конструкции и ряда прочностных характеристик они уступают искусственным [1].

Различными отечественными и зарубежными учеными была показана принципиальная возможность применения базальтовых волокон для улучшения эксплуатационных и физико-механических свойств мелкозернистого бетона. Массовое применение базальтофибробетона (БФБ) в строительстве сдерживается недостаточной изученностью его долговечности, износостойкости и пригодности в различных условиях

эксплуатации. Препятствиями для широкого внедрения этого материала являются отсутствие технологических решений, направленных на получение БФБ с нормируемыми физико-механическими характеристиками, неоднозначность результатов исследований стойкости базальтового волокна в цементных матрицах, а также данных о долговечности в нормативных и руководящих материалах для проектирования [2].

Базальтовые волокна представляют интерес для применения в строительстве благодаря их механическим характеристикам. Основные из них: диаметр волокон от 10 до 20 мкм; температура применения от -200 до $+600$ °С; плотность $2\,800$ кг/м³; модуль упругости от $9\,100$ до $11\,000$ МПа.

Исследования образцов из высокопрочного бетона свидетельствуют о том, что добавление в них базальтовой фибры повышает его прочность при растяжении на 42–48 % [3]. В статье [4] также было отмечено, что базальтовая фибра существенно увеличивает энергоёмкость разрушения мелкозернистого бетона до 2,2 раза.

В результате изучения влияния содержания базальтовой фибры на энергоёмкость ударного разрушения после определенного числа циклов замораживания и оттаивания в работе [5] были получены следующие данные: энергозатраты на разрушение образцов, содержащих 2 и 4 % базальтовой фибры после 5 циклов замораживания/оттаивания превосходят энергозатраты на разрушение образцов контрольной (неармированной) серии на 19 и 60 % соответственно, что говорит о повышении морозостойкости материала, армированного базальтовым волокном (рис. 1).

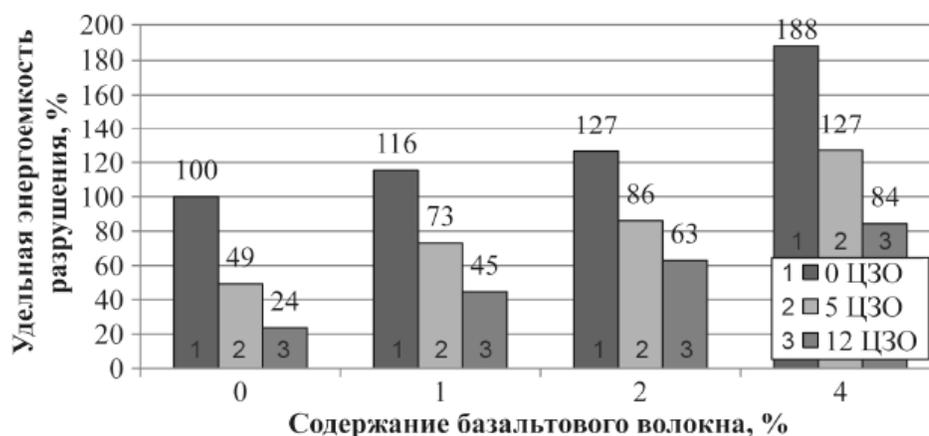


Рис. 1. Изменения удельной энергоёмкости разрушения мелкозернистого бетона, армированного базальтовым волокном, при неизменном количестве сбрасываний груза, в зависимости от количества циклов замораживания/оттаивания [5]

Решением вопросов экономии, энерго- и ресурсосбережения при производстве фибробетона может стать использование техногенных отходов, в большом количестве получаемых при реконструкции и ремонте промышленных зданий и сооружений или коммуникационных сетей, где одним из основных является минеральная (либо стеклянная) вата [6].

Проведенные в работе [7] экспериментальные исследования показали, что применение базальтовых волокон при дисперсном армировании бетонов позволяет не только увеличить прочностные показатели при сжатии и растяжении в 1,5 и 1,3 раза

соответственно, но и значительно улучшить деформативные характеристики материала: повысить значения предельных деформаций при сжатии на 79 %, при растяжении – на 56 %, увеличить начальный модуль упругости на 23 %.

За рубежом также проводятся исследования свойств фибробетонов. Д. Брэнстон [8] обнаружил, что добавление базальтовой фибры в бетон является эффективным средством для предотвращения трещинообразования в результате снижения свободной усадки бетона, а также для замедления роста трещин, если они все же возникают.

В статье [9] выявлено, что добавление всего лишь 1 % фибры от массы вяжущего значительно повышает момент трещинообразования в бетоне (рис. 2).

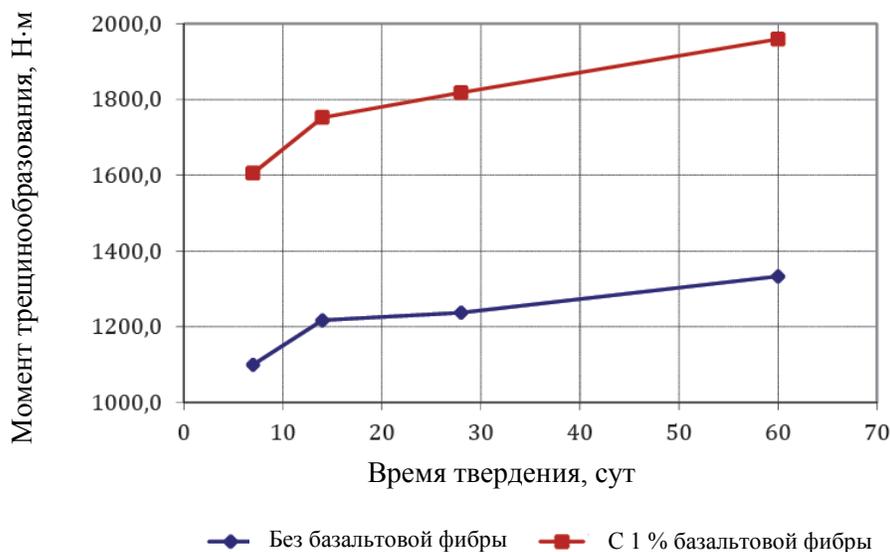


Рис. 2. Момент трещинообразования образцов из высокопрочного бетона в зависимости от времени твердения [12]

Другой насущной проблемой экологического и технического характера при получении эффективных цементобетонных изделий является модифицирование цемента путем использования дисперсных добавок. При производстве цемента CO_2 выделяется в атмосферу как непосредственно во время нагревания карбоната кальция с образованием извести и диоксида углерода, так и (косвенно) в ходе сжигания большого количества топлива. Цементная промышленность создает около 10 % глобальных антропогенных выбросов CO_2 , из которых 60 % приходится на химический процесс, а 40 % – на сжигание топлива. Согласно проведенным исследованиям, на 4 млрд т цемента, производимого ежегодно, приходится 8 % мировых выбросов CO_2 . Эти выбросы могут быть уменьшены за счет снижения содержания клинкера в цементе, а также с помощью альтернативных методов производства цемента, таких как использование тонкодисперсных добавок на основе вторичного сырья промышленного производства и сырья от переработки горных пород (шлаков, зол, микрокремнезема, карбонатной муки). Наличие в строительной смеси эффективных модифицирующих добавок может обеспечить снижение расхода цемента на 1 м^3 растворной или бетонной смеси до 15–30 %, а также улучшить свойства материала при правильном подборе состава [10].

Микрокальцит – минеральный наполнитель высокого качества, который используют в качестве добавки к бетону и не только. Любая каменная мука, особенно полученная из мрамора, т.е. микрокальцит, повышает строительные качества бетона. Она делает его прочнее, увеличивает стойкость к коррозии и снижает водопоглощение. Так, в бетонах повышенной прочности каменную муку применяют как закрашивающий наполнитель. С его использованием производится ряд строительных смесей (сухие штукатурочные покрытия; шпаклевки; затирки, замазки; строительные растворы декоративного применения; красящие составы; побелки).

Тонкодисперсные наполнители получили широкую популярность в бетонном производстве, поскольку добавляют бетону ряд специальных свойств: повышают плотность структуры материала; снижают вероятность образования пор и пустот; увеличивают водонепроницаемость смесей; уплотняют контактную зону цемента с наполнителем.

Установлено, что в мраморе имеется некоторое количество растворимых соединений, представленных по большей части бикарбонатом кальция, который может помогать формированию указанных выше соединений не только на поверхности мрамора, но и внутри цементного камня. Протекание химических реакций мрамора с продуктами гидратации цемента приводит к повышению прочности бетона, а также снижению его водопоглощения и повышению морозостойкости вследствие уплотнения внутриводякового пространства цементного камня [11].

В статье [12] опытным путем было установлено, что с повышением дисперсности микрокальцита происходит постепенное улучшение всех свойств цементного камня. Так, если прочность на сжатие бездобавочного состава составляла 53 МПа, а на изгиб – 21 МПа, то у состава, содержащего микрокальцит дисперсностью 300 мкм, прочность на сжатие была 82 МПа, а на изгиб – 53 МПа. При введении 5 % микрокальцита и с ростом его фракции значение пористости плавно уменьшалось с 7,1 до 4,8 %. При повышении дисперсности микрокальцита наблюдалось снижение значений водопоглощения от 3,4 % для бездобавочного состава до 2,1 % для состава, содержащего микрокальцит с фракцией 300 мкм.

Озвученные выше рецептурные факторы не являются единственными параметрами, которые необходимо учитывать при получении эффективных тонкостенных облицовочных материалов, набирающих сегодня большую популярность. При использовании многослойных конструкций особое место в архитектуре занимает именно отделочный слой. Важными свойствами, кроме эстетической стороны, являются долговечность и прочность. Масштабы объектов капитального строительства растут с каждым годом, и сложность их обслуживания тоже возрастает, поэтому особое внимание уделяется размерам, весу и удобству эксплуатации облицовочных материалов.

К числу востребованных на рынке форм-факторов облицовочных материалов относятся бетонные тонкостенные панели. Применение новых большиеразмерных изделий является основной задачей для проектировщиков-архитекторов. Одним из самых эффективных материалов для таких изделий выступает фибробетон. Его преимущества заключаются в высокой прочности на сжатие и растяжение при изгибе, огнестойкости, атмосферостойкости, эстетичности, практически водонепроницаемости материала. Все они наиболее полно реализуются в фибробетонных тонкостенных облицовочных панелях, достигаются в том числе и за счет эффективной технологии изготовления данных изделий. Наиболее часто применяемая технология делится на два вида – вибролитье и

торкретирование. В первом случае раствор мелкодисперсной бетонной смеси с фиброй вымешивается в смесителе и формируется путем литья и вибрационного воздействия (рис. 3). Во втором случае смесь наносится с помощью специализированного оборудования (рис. 4).



Рис. 3. Технология вибролитья [13]



Рис. 4. Технология торкретирования [13]

Малый вес фибробетонных тонкостенных облицовочных панелей достигается прежде всего за счет их толщины. Панели имеют достаточно большую плотность (до $1\,800\text{ кг/м}^3$), и при толщине изделий от 25 до 40 мм их средняя масса составляет 54 кг/м^2 .

У технологии торкретирования важными преимуществами являются относительная быстрота изготовления, возможность получения изделий сложной конфигурации и способность к нанесению сразу на подоснову (несущую стену, кладку и т.п.). Недостатки этого метода: относительная пористость материала, появление на лицевой поверхности волосков фибры, что отрицательно сказывается на эстетической стороне изделий, а также неоднородность нанесения, которая сильно зависит от профессионального навыка изготовителя.

Второй способ позволяет получать материалы с высокой плотностью (до $2\,350\text{ кг/м}^3$) и прочностью, а также качеством лицевого слоя за счет высокочастотного вибрирования (фибра под вибрацией поднимается с поверхности формообразователя).

Использование дополнительной вибрации в целом улучшает качество материала, но усложняет процесс изготовления [13].

Фибробетонные плиты эффективно использовать в фасадных системах быстровозводимых зданий. Стоимость фибробетона значительно выше стоимости обычного бетона. Данный недостаток компенсируется долговечностью материала. Фибробетоны дают экономический эффект за счет высоких показателей долговечности, эксплуатационной пригодности, износостойкости, трещиностойкости, ударопрочности, а также повышения межремонтного ресурса и безопасности зданий и сооружений при пожарах и сейсмических воздействиях.

Данный продукт отвечает как требованиям качества, так и стремлению к использованию тонких и сравнительно легких большемразмерных изделий. В целом использование фибробетона является гораздо более экономичным, чем использование железобетона, особенно с учетом экономии сырьевых ресурсов и затрат на транспортировку и монтаж конструкций. Фибробетон имеет отличные характеристики (термостойкость и морозостойкость, негорючесть и стойкость к воздействию микроорганизмов), благодаря которым он находит широкое применение в особо суровых климатических условиях [14].

В заключение необходимо сделать следующие выводы: базальтовое волокно в составе фибробетона (в определенной пропорции) значительно повышает многие эксплуатационные характеристики, такие как прочность на сжатие и изгиб, морозостойкость, трещиностойкость; микрокальцит в составе бетона положительно влияет на прочность и плотность готового изделия, увеличивая их. На основе двух данных компонентов можно создать эффективные облицовочные изделия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котляревская А.В., Лубенец Я.В., Котляревский А.А. Актуальность применения базальтовой фибры в современном строительстве // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 11. С. 507–516.
2. Окольников Г.Э., Йочич М., Курлин М. Перспективы применения полидисперсно-армированных фибробетонов // *Системные технологии*. 2021. № 1 (38). С. 86–88.
3. Плевков В.С., Колупаева С.Н., Кудяков К.Л. Расчетные диаграммы нелинейного деформирования базальтофибробетона при статических и кратковременных динамических воздействиях // *Вестник ТГАСУ*. 2016. № 3. С. 95–109.
4. Алексеев К.Н., Курилко А.С., Захаров Е.В. Влияние базальтового волокна (фибры) на вязкость и энергоемкость разрушения мелкозернистого бетона // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 12. С. 56–63.
5. Алексеев К.Н. Влияние циклов замораживания-оттаивания на способность мелкозернистого бетона сопротивляться динамическим (ударным) нагрузкам в зависимости от содержания базальтовой фибры // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2018. № 12. С. 84–91.
6. Демьяненко О.В., Копаница Н.О., Ничинский А.Н. Физико-технические свойства фибробетонов с использованием вторичного минераловатного сырья // *Современные бетоны: наука и практика*. 2019. С. 16–20.
7. Бучкин А.В. Мелкозернистый бетон высокой коррозионной стойкости, армированный тонким базальтовым волокном. Дисс... канд. техн. наук. М. 2011. 20 с.

8. Branston J., Das S., Kenno S.Y., Taylor C. Influence of Basalt Fibres on Free and Restrained Plastic Shrinkage // *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 74. P. 182–190.
9. Харун М., Коротеев Д.Д., Дхар П., Ждеро С., Елроба Ш.М. Физико-механические свойства базальто-волоконистого высокопрочного бетона // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2018. № 14 (15). С. 396–403.
10. Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А. Комплексные добавки на основе вторичных ресурсов для модификации цементных композиций // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023. Т. 334. № 1. С. 136–144.
11. Повышение коррозионной стойкости базальтового волокна в цементных бетонах / К.А. Сарайкина [и др.] // *Строительные материалы*. 2016. № 1-2. С. 27–31.
12. Урбанов А.В., Манушина А.С., Дмитриева Е.А., Курдюмова С.Е., Потапова Е.Н. Разработка строительной смеси для малых архитектурных форм // *Успехи в химии и химической технологии*. 2017. Т. 31. № 1. С. 25–27.
13. Огнева К.Н. Применение тонкостенных армированных материалов для облицовки гражданских зданий // *Научные труды Калужского государственного университета имени К.Э. Циолковского. Серия: Естественные и технические науки*. Калуга: КГУ им. К.Э. Циолковского, 2020. С. 48–52.
14. Давтян А.С., Киракосян В.А. Предпосылки развития тонкостенных конструкций в перспективе использования в строительстве быстровозводимых зданий. *Проектирование и строительство: Сборник научных трудов 4-й Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров*. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. С. 104–108.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЭКВИСТ Кирилл Алексеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: hgfcch@gmail.com

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Эквист К.А., Белов В.В. Эффективные фибробетонные тонкостенные облицовочные изделия // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 5–12.

**EFFECTIVE FIBER-CONCRETE THIN-WALLED
CLADDING PRODUCTS**

K.A. Ekvist, V.V. Belov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article gives an overview of the use of basalt fiber and other additional components (e.g. microcalcite) to improve the construction and technical properties of concrete, microcalcite) to improve the construction and technical properties of concrete. The analysis of of sources has shown that the use of basalt fiber as a reinforcing component has a positive effect on a number of material properties such as flexural strength, compressive strength and frost resistance, while microcalcite reduces the porosity of the material and increases its density.

Keywords: basalt fibre, micro-reinforcing component, fibre concrete, microcalcite.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

EKVIST Kirill Alekseevich – Master's student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: hgfcch@gmail.com

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Ekvist K.A., Belov V.V. Effective fiber-concrete thin-walled cladding products // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 3 (23), pp. 5–12.

УДК 691.328

**ДЕФЕКТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ НАРУШЕНИИ
НОРМ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Ю.Ю. Курятников
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Курятников Ю.Ю., 2024

Аннотация. При анализе рекламаций на железобетонные изделия выявлено, что большое количество причин возникновения дефектов связано с нарушением правил и норм транспортировки, складирования, монтажа и эксплуатации изделий и сооружений. Представлены реальные примеры из практики, методы решения проблемы.

Ключевые слова: железобетонные изделия, обследования изделий и сооружений, дефекты, нормы складирования, нормы монтажа, правила эксплуатации, многопустотные плиты перекрытий, коррозия бетона.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-12-20

Жизненный цикл строительного материала включает следующие этапы: добычу сырья, изготовление материалов и изделий, процесс строительства, эксплуатацию, утилизацию или повторное использование в качестве техногенного отхода. На этапах изготовления, строительства и эксплуатации железобетонные изделия испытывают различные по характеру и интенсивности механические, физические, химические и биологические воздействия, которые могут отрицательно влиять на прочностные характеристики, вызывать коррозию бетона и арматуры [1]. В данной статье представлен практический опыт разбора основных причин образования дефектов некоторых железобетонных изделий, а также указаны мероприятия по предотвращению этих нежелательных явлений.

Анализ дефектов и повреждений железобетонных изделий показывает следующие аспекты:

в первую очередь они возникают по причине неправильной перевозки, складирования на объекте, а также низкого качества строительно-монтажных работ;

во вторую – из-за нарушений правил эксплуатации (появляются механические повреждения, коррозия бетона и арматуры);

в третью – из-за ошибок проектирования (ошибки в расчетах конструкций);

в четвертую – из-за некачественно изготовленных изделий.

Дефекты, повреждения железобетонных изделий и конструкций нередко возникают при совокупности указанных факторов. При обнаружении дефектов заказчик в большинстве случаев не разбирается во всех обстоятельствах. Основной причиной он считает то, что изделие некачественно изготовлено, а это далеко не всегда является истиной.

Примеры нарушения норм складирования изделий

Распространенная причина появления трещин – неправильная перевозка и складирование на объекте [2]. При неправильном складировании в конструкциях возникают такие усилия от собственного веса, на которые они не рассчитаны. Например, если подкладки под балками или плитами расположены далеко от торцов, то в нормальных сечениях возникают большие изгибающие моменты отрицательного знака, растягивающие верхнюю грань, где армирование мало или вообще отсутствует. Это может привести не только к образованию больших трещин у верхней грани, но и к излому (разрушению) изделия. Особенно требовательны в этом отношении преднапряженные конструкции, у которых к моменту от собственного веса M_w добавляется момент от силы предварительного обжатия M_p , причем тоже отрицательного знака (рис. 1а).

Повредить сборные изделия можно, даже если не сильно удалять подкладки от торцов. Достаточно, например, при штабелировании плит или свай расположить подкладки не строго друг под другом, а со смещением. Тогда возникнут большие изгибающие моменты, растягивающие нижнюю грань, и произойдет разрушение нижних изделий, не рассчитанных на столь большие нагрузки (рис. 1б, рис. 2).

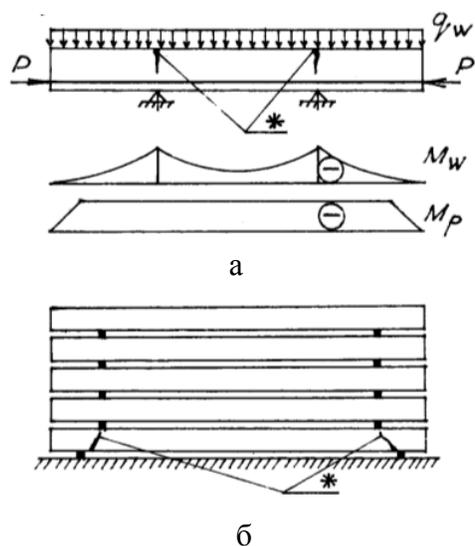


Рис. 1. Неправильное складирование плит:
а – подкладки далеко от торцов;
б – подкладки со смещением; * – трещина



Рис. 2. Неправильное складирование переключек

В процессе перевозки необходимо обеспечить надежное крепление изделий на транспортном средстве цепями или ремнями для исключения продольного и поперечного смещения, а также взаимного столкновения и «подпрыгивания». На рис. 3 представлены сколы на трубе Т 40.50, образовавшиеся при транспортировании без должного крепления и установки прокладок. На рис. 4 показан вариант укладки труб Т 40.50 на резиновые прокладки для предотвращения соударения.



Рис. 3. Неправильная перевозка труб



Рис. 4. Резиновые прокладки между трубами

Очень часто на строительной площадке неправильно складировают трубы, что приводит не только к образованию трещин, но и к полному разрушению (особенно в зимний период). На рис. 5 продемонстрирован случай, когда безнапорные центрифугированные трубы Т 50.50 уложили на неподготовленное и невыровненное основание, после чего они вмерзли в снег. При подъеме трубы сломались пополам. Для предотвращения подобных ситуаций необходимо соблюдать требования ГОСТ 13015-2012. Площадка склада должна иметь плотную и выровненную поверхность с небольшим уклоном для водоотвода. Не допускается опирание изделий на грунт или кузов без подкладок. При укладке изделий в штабели подкладки и прокладки по высоте штабеля следует располагать одну над другой. Изделия, показатели качества которых могут ухудшаться при попадании атмосферной влаги, должны быть защищены от осадков. Угол между ветвями строп при перемещении должен быть не более 90° .



Рис. 5. Неправильное складирование труб и последствия

Примеры нарушения норм монтажа многопустотных плит перекрытий

При нарушении правил монтажа на многопустотных плитах перекрытий могут возникать продольные трещины, а также возможны отслоения бетона под пустотными каналами, высолы на потолочной поверхности (рис. 6). Для устранения данных дефектов

требуются серьезный ремонт изделий, усиление, а в некоторых случаях необходима замена конструкций.



Рис. 6. Дефекты на многопустотных плитах перекрытий после монтажа

Если в процессе хранения на складе готовой продукции или при транспортировке многопустотных плит перекрытий шли дожди, снег, то данные осадки, как правило, собираются в пустотах плит. Они попадают через открытые пустоты и монтажные отверстия. Если перед монтажом не обратить на это внимание и смонтировать плиты, то вода через некоторое время будет просачиваться через бетон под пустотными каналами, а при отрицательной температуре замерзнет и «разорвет» его.

Для предотвращения указанных случаев перед монтажом плиты кантуют таким образом, чтобы слить воду из пустотных каналов. После монтажа плит отверстия в верхней полке (в местах расположения монтажных петель) должны быть заделаны бетоном класса не менее В15 в этот же день во избежание попадания воды или снега в пустотные каналы. После монтажа плит в случае обнаружения подтеков (мокрых полос) на потолочной поверхности (а также в зимний период после таяния снега в каналах плит) необходимо немедленно просверлить отверстия под пустотными каналами, чтобы слить остаточную воду. Затем отверстия следует заделать ремонтным раствором.

Белые высолы на потолочной поверхности – коррозия выщелачивания. Данный вид коррозии включает в себя процессы, возникающие в бетоне при действии жидких сред, способных растворять $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и другие компоненты цементного камня и выносить их из структуры бетона, что приводит к медленному разрушению данного участка конструкции.

При превышении расчетной нагрузки на многопустотных плитах перекрытий могут возникать прогибы и поперечные трещины по центру плиты. У плиты 1ПК 43.10-8т (рис. 7а) на потолочной поверхности были две трещины с раскрытием до 0,3 мм. По центру на плите стояла палета с кирпичом с нагрузкой 715 кгс/м^2 . Расчетная нагрузка для данной плиты составляла 800 кгс/м^2 ; разрушающая – не менее $1\,140 \text{ кгс/м}^2$; контрольная нагрузка по трещиностойкости – 570 кгс/м^2 . Сосредоточенная по центру плиты нагрузка от кирпича 715 кгс/м^2 превышает контрольную нагрузку по трещиностойкости. В этом

кроется причина образования трещин с шириной раскрытия выше допустимой. Во избежание образования трещин рекомендуется смещать необходимые грузы к опорной зоне плит (рис. 7б).

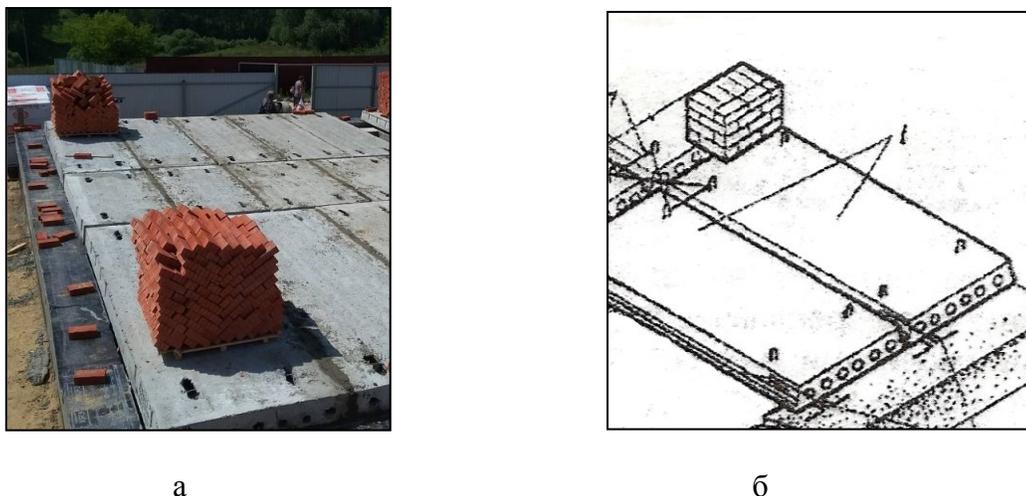


Рис. 7. Складирование кирпича на плитах:
а – неправильное; б – правильное

Пример нарушения правил эксплуатации железнодорожных плит

При реконструкции и строительстве новых железнодорожных платформ используются современные строительные материалы, изделия заводского изготовления и технологии, благодаря которым значительно увеличиваются сроки эксплуатации объектов. Отличительной чертой новых платформ является их устройство: на несущие конструкции основания укладываются железобетонные элементы с готовым внешним покрытием. К современным железобетонным изделиям заводского изготовления с таким покрытием можно отнести железнодорожные плиты со вскрытым заполнителем, краевые балки, угловые элементы платформ. Противоскользкий эффект поверхности достигается за счет применения технологии вскрытия заполнителя бетона. Зачастую при несоблюдении правил эксплуатации пассажирских платформ строительные изделия и конструкции, которые должны были служить не менее 10 лет без дополнительного ремонта, приходят в негодность через 1–2 года после монтажа [3, 4]. Причинами преждевременного разрушения таких изделий являются применение агрессивных хлоридных противогололедных реагентов в зимний период, ручных средств (ледорубов и ломов), пренебрежение методами вторичной защиты изделий, нарушение требований проектной документации при строительстве.

В настоящее время выбор противогололедных реагентов очень широкий. Чаще всего используются хлоридные реагенты, так как они достаточно дешевы [5]. При обработке бетонной поверхности противогололедным реагентом происходит таяние льда и снега. Затем вода с растворенной солью впитывается в поры бетона и частично остается на поверхности. Далее в порах бетона в результате испарения воды из агрессивного раствора происходит кристаллизация растворенных солей. При накоплении соли в порах может появиться кристаллическое давление, которое при определенных условиях превышает

прочность бетона на растяжение, из-за чего возникают трещины и разрушения бетона (коррозия бетона при кристаллизации солей (рис. 8)).



Рис. 8. Разрушение угловых элементов платформ

Разрушение угловых элементов платформ также ускоряется за счет применения ручных средств борьбы с гололедом и по причине нарушения требований проектной документации. Если платформа на некоторых участках не имеет уклона поверхности и происходит постоянное скопление воды, то это приводит к коррозии выщелачивания и образованию наледи в зимний период (рис. 9). Уклон поверхности платформ в поперечном направлении следует предусматривать не более 1 : 100. Для боковых платформ уклон должен быть направлен в сторону от железнодорожных путей с устройством водоприемного лотка.

Чтобы предотвратить коррозионное разрушение бетонных и железобетонных изделий транспортного строительства в результате воздействия агрессивной среды, нужно обеспечить вторичную защиту, которая заключается в обработке поверхности железобетонного изделия гидрофобизирующим составом глубокого проникновения с высокой степенью защиты.



Рис. 9. Скопление воды на платформе

Практический опыт показывает, что большое количество причин возникновения дефектов железобетонных изделий вызвано нарушением правил и норм транспортировки, складирования, монтажа и эксплуатации. Для обеспечения долговечности строительных изделий и конструкций необходимо учитывать комплекс мероприятий, который включает проектирование, организацию технологического процесса, монтаж, уход при эксплуатации. Следует предусматривать мероприятия по обеспечению коррозионной стойкости материалов, изделий и конструкций, а также своевременно выполнять все виды ремонта конструкций (планово-предупредительный, текущий, капитальный) и устранять дефекты на этапе появления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касимов Р.Г. Дефекты и повреждения строительных конструкций, методы и приборы для их количественной и качественной оценки: учебное пособие. Оренбург: ОГУ, 2016. 109 с.
2. Новикова В.Н., Литвинов Р.С. Совершенствование транспортировки строительных конструкций // *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/VD_126_Litvinov_N.pdf_37d1276fac.pdf (дата обращения: 25.07.2024).
3. Щербань Е.М., Стельмах С.А. О причинах разрушения железобетонных изделий и конструкций для энергетического строительства // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2020. Т. 10. № 2. С. 286–293. URL: <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2020-2-286-293> (дата обращения: 25.07.2024).
4. Созаев А.А., Пилова Ф.И. Коррозионные повреждения железобетонных конструкций и причины их возникновения // *Известия Кабардино-Балкарского ГАУ*. 2019. № 4 (26). С. 49–53.
5. Попов В.Г., Чурюкина С.В., Дусеев Д.И. Механизм разрушения бетонов при воздействии на них хлоридных антигололедных реагентов // *Евразийский союз ученых: науки о земле*. 2016. № 5 (26). С. 121–124.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

КУРЯТНИКОВ Юрий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Курятников Ю.Ю. Дефекты железобетонных изделий при нарушении норм строительства и эксплуатации зданий и сооружений // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 3 (23). С. 12–20.

**DEFECTS IN REINFORCED CONCRETE PRODUCTS DUE TO VIOLATION
OF CONSTRUCTION AND OPERATION STANDARDS
FOR BUILDINGS AND STRUCTURES***Yu.Yu. Kuryatnikov**Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The analysis of claims for reinforced concrete products reveals that a large number of causes of defects are associated with violation of rules and regulations of transportation, storage, installation and operation of products and structures. Real examples from practice, methods of solving the problem are presented.

Keywords: reinforced concrete products, inspections of products and structures, defects, storage standards, installation standards, operating rules, hollow-core slabs, concrete corrosion.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

KURYATNIKOV Yuri Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Kuryatnikov Yu.Yu. Defects in reinforced concrete products due to violation of construction and operation standards for buildings and structures // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 3 (23), pp. 12–20.

УДК 725.381.3

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ
ПАРКОВОЧНОГО ПРОСТРАНСТВА ЗА СЧЕТ ВНЕДРЕНИЯ
МНОГОУРОВНЕВЫХ АВТОСТОЯНОК НА ПРИМЕРЕ Г. ТВЕРИ***А.Ш. Магдеев, А.В. Левиков**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Магдеев А.Ш., Левиков А.В., 2024

Аннотация. В статье рассмотрена и проанализирована эффективность внедрения различных типов механизированных автостоянок, оценено их использование в новых и давно существующих зданиях различного назначения. Проведено сравнение параметров плотности заполнения пространства местами автостоянок как фактора, влияющего на стоимость парковочного места и являющегося одним из возможных путей решения проблемы организации парковочного пространства в густонаселенных районах городов.

Ключевые слова: многоуровневая автостоянка, механизированная парковка, парковочное пространство, роторный тип, башенный тип, мозаичный тип, конвейерный тип, подземная и наземная автостоянка.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-20-26

В последние десятилетия наблюдается бурный рост числа автомобилей в городах по всему миру. Процесс автомобилизации оказывает значительное влияние на жизнь современного общества, однако он создает серьезную проблему нехватки парковочных мест. Стремительный рост числа автомобилей должен сопровождаться соответствующим ростом не только транспортной, но и городской инфраструктуры. На рис. 1 представлены данные об увеличении количества автомобилей в г. Твери [1].

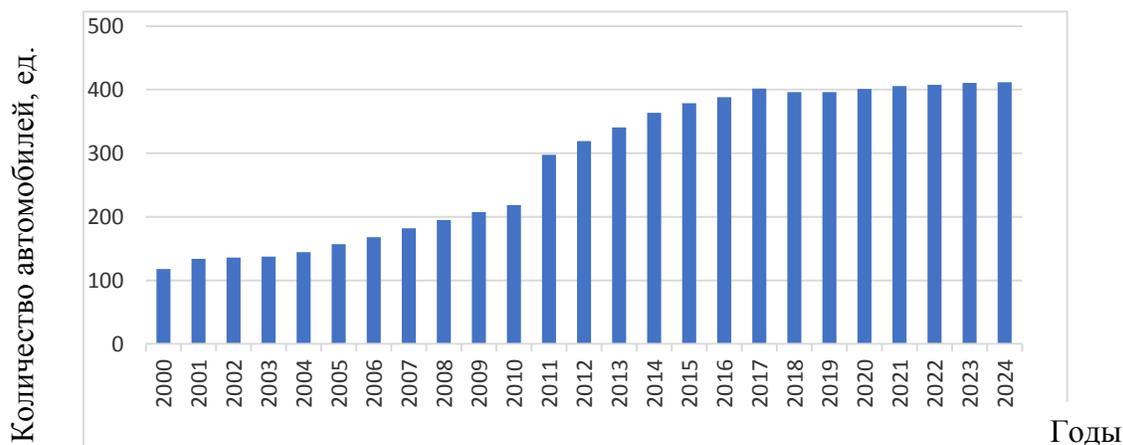


Рис. 1. Уровень автомобилизации г. Твери (авто/1 000 чел.) в 2000–2024 годы

Отсутствие свободных территорий и пространства приводит к острой нехватке парковочных пространств, особенно в исторических центрах городов с высокой плотностью застройки. В настоящее время все более востребованным становится внедрение системы механизированных многоуровневых парковок, которая позволяет частично решить вышеуказанную проблему и удовлетворить потребности горожан на ограниченных участках [2, 3].

Названная система не только повышает экономическую эффективность и приносит значительную выгоду застройщику, но и открывает новые возможности проектирования [4]. Механизированные автостоянки можно создать в виде отдельно стоящих зданий, они также могут быть включены в состав проектируемых зданий различного назначения или внедрены в существующие объекты капитального строительства.

Первый способ: использование механизированных систем

Согласно градостроительным нормам [5], новое жилье должно иметь определенное количество парковочных мест. Заказчик стремится максимально эффективно использовать все пространство, отведенное под парковку. Поскольку затраты на строительство механизированной автостоянки могут составлять половину от ее общей стоимости (наравне с затратами на технологическую часть), то рациональная, плотная схема стоянки может привести к значительной экономии.

Проанализируем основные типы современных механизированных автомобильных парковок [6]:

1. Роторный тип

Суть системы основана на принципе большой карусели, где логический контроллер управления самостоятельно выбирает оптимальный способ доставки автомобиля, при этом вращая механизм в ту или иную сторону. Постановка и выдача автомобиля происходят по кратчайшему пути движения роторного контура (рис. 1).

2. Высотная стоянка башенного типа

Система хранения автомобилей реализована с помощью центрального вертикального грузового лифта и манипулятора с горизонтальным перемещением. Манипулятор устанавливает автомобили в ячейки хранения, расположенные по обе стороны от лифта. Такая схема парковки гармонично вписывается в архитектурный стиль давно существующих и недавно построенных многоэтажных зданий (рис. 2).

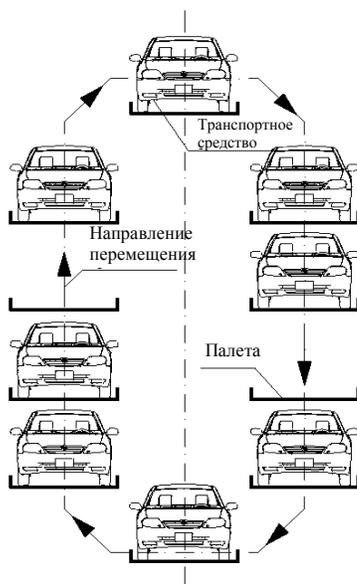


Рис. 1. Роторный тип



Рис. 2. Башенный тип

3. Высотная стоянка мозаичного типа

Система механизации оснащена центральным вертикальным грузовым подъемником, оборудованным двумя манипуляторами. Принцип работы основан на поочередном перемещении палет по вертикали и горизонтали, что позволяет размещать их в свободные ячейки хранения [7]. Нижний ярус с поворотным устройством используется для въезда и выезда транспортного средства со стоянки (рис. 3).

Преимущество используемой схемы в том, что один подъемник обслуживает большое количество палет. Однако такая система требует большего пространства для реализации, что может быть проблематично, особенно в исторических центрах городов.

4. «Плоскостная» стоянка конвейерного типа

Система хранения автомобилей основана на вертикальном грузовом подъемнике, оснащенный «самобеглыми» тележками с манипуляторами на каждом ярусе. Тележки перемещают автомобили по ячейкам хранения, двигаясь по горизонтальным рельсам, аналогичным конвейерной системе (рис. 4) [8]. С обеих сторон этих рельсов расположены лифты, обеспечивающие вертикальное перемещение тележек между ярусами.

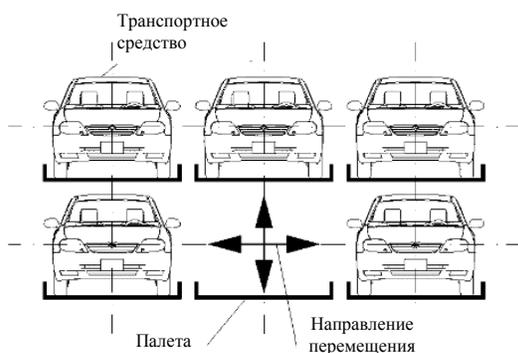


Рис. 3. Мозаичный тип

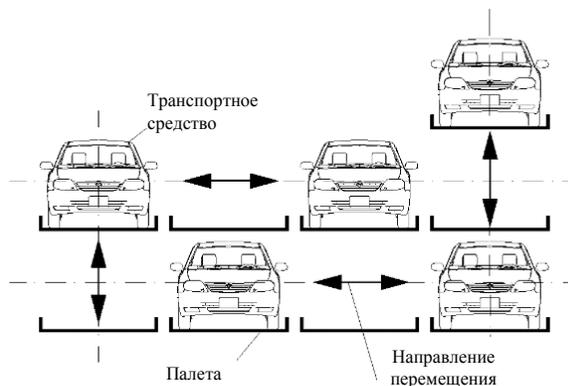


Рис. 4. Конвейерный тип

В результате анализа (таблица) можно сделать вывод, что наиболее выгодным с точки зрения плотности является роторный тип, поскольку при увеличении количества уровней плотность упаковки машин стремится к единице. Оставшиеся типы систем механизации имеют меньшую плотность упаковки вне зависимости от количества уровней. Однако необходимо учитывать, что максимальная плотность упаковки считается одним из параметров, характеризующих эффективность организации парковочного пространства.

Параметры механизированных автостоянок,
характеризующие их плотность упаковки при М ярусов

№	Тип механизации стоянки	Максимальное количество машин	Действительное количество машин	Плотность машино-места
1	Роторный	$2 \cdot M$	$2 \cdot M - 2$	$1 - \frac{1}{M}$
2	Башенный	$3 \cdot M$	$2 \cdot M - M$	$\frac{2}{3} - \frac{2}{3 \cdot M}$
3	Мозаичный	$9 \cdot M$	$6 \cdot M - 3$	$\frac{2}{3} - \frac{1}{3 \cdot M}$
4	Конвейерный	$9 \cdot M$	$6 \cdot M - 3$	$\frac{2}{3} - \frac{1}{3 \cdot M}$

Второй способ: интеграция автостоянок в структуру существующих зданий

В конце 1960-х годов возникла потребность в регулировании строительства гаражей. В исторических центрах городов местные органы власти начали ограничивать их возведение. По итогу стали появляться многоэтажные гаражи, которые располагались не только в отдельных зданиях, но и над или под другими сооружениями.

Растущие потребности в парковочных местах особенно актуальны в исторических районах городов, где плотная застройка и ограниченность свободных территорий создают сложности для организации традиционных наземных стоянок. В этих условиях перспективным решением становится интеграция автостоянок в существующие здания,

такие как ценные градостроительные объекты и объекты культурного наследия. Указанный подход позволяет рационально использовать ограниченные городские пространства, не нарушая исторический облик и архитектурную ценность памятников. Механизированные системы хранения автомобилей, размещаемые внутри или пристраиваемые к историческим зданиям, обеспечивают компактное размещение парковочных мест без расширения наземных площадей. При этом важно, чтобы проектные решения обеспечивали бережное отношение к архитектурно-художественным и конструктивным особенностям объектов культурного наследия. Необходим тщательный анализ возможностей адаптации исторических построек к размещению механизированных систем хранения при минимальном вмешательстве в их структуру.

Зачастую интеграция автостоянок предполагает возведение пристроек или подземных парковочных уровней, подчиненных стилистике и масштабу памятника. Важно также продумывать организацию доступа, обеспечение безопасности и решение других функциональных задач, не нарушающих исторический облик зданий.

В условиях плотной городской застройки с ограниченными и дорогими земельными участками актуальным становится создание экономически эффективных парковочных решений в исторической застройке. Анализ показал, что для достижения максимальной эффективности необходимо комплексное проектирование, учитывающее специфику городской среды и стремление к оптимальному использованию ограниченного пространства.

Следует отметить, что при организации парковочного пространства в существующей городской застройке нужно уделять внимание экологическим, санитарно-гигиеническим и экономическим факторам. Таким образом, грамотный подход к интеграции механизированных стоянок в существующие объекты культурного наследия позволяет находить баланс между требованиями современности и сохранением ценных исторических построек. Подобные решения становятся примерами удачного сочетания новых технологий и бережного отношения к архитектурному наследию.

Применение современных технологий может стать новым стандартом в области организации парковочных систем, поскольку обеспечиваются удобство, безопасность и максимальная эффективность использования имеющегося пространства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комплексная схема организации дорожного движения в границах городского округа города Твери Тверской области // *Администрация города Твери*. 2019. Т. 1. 433 с.
2. Formentin S., Berretta D., Urbano N., Boniolo I., Filippi P.D., Savaresi S. M. A Parking Assistance System for Small-Scale Boats // *IEEEASME Trans. Mechatron*. 2013. Vol. 18. Iss. 6. P. 1844–1849.
3. Manukhina L. Analysis of Modern Approaches to the Organization of Parking Areas in Major Cities // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 193. P. 01037.
4. Danilina N., Vlasov D. Aspects of Transport Transit Hubs Construction Management in Coordination with Object Lifecycle Projecting // *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 86. P. 05017.
5. СП 42.13330.2016 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054209> (дата обращения: 23.06.2024)
6. Горильченко М.А. Сравнительный анализ современных систем механизированной парковки автомобилей // *Механизация строительства*. 2013. № 7 (829). С. 35–38.

7. Гнездилов С.Г. Обзор средств механизации парковочного пространства // *Наука и образование*. 2012. № 7. С. 65–86.
8. Гнездилов С.Г. Устройство автоматизированной системы парковки автомобилей // *Механизация строительства*. 2012. № 10. С. 39–42.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МАГДЕЕВ Андрей Шавкатович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: andrey1649@yandex.ru

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Магдеев А.Ш., Левиков А.В. Повышение эффективности организации парковочного пространства за счет внедрения многоуровневых автостоянок на примере г. Твери // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 3 (23). С. 20–26.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF PARKING SPACE ORGANIZATION THROUGH THE INTRODUCTION OF MULTI-LEVEL PARKING LOTS ON THE EXAMPLE OF THE CITY OF TVER.

A.Sh. Magdeev, A.V. Levikov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article considers and analyzes the effectiveness of the introduction of various types of mechanized parking lots, evaluates their use in new and long-existing buildings of different purposes. The article compares the parameters of the density of space filling with parking spaces as a factor affecting the cost of a parking space and being one of the possible ways to solve the problem of parking space organization in densely populated areas of cities.

Keywords: multi-level parking, mechanized parking, parking space, rotor type, tower type, mosaic type, conveyor type, underground, surface parking lot.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

MAGDEEV Andrey Shavkatovich – Master’s Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: andrey1649@yandex.ru

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Magdeev A.Sh., Levikov A.V. Improving the efficiency of parking space organization through the introduction of multi-level parking lots on the example of the city of Tver // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 3 (23), pp. 20–26.

УДК 621.373.8:69

**ПРИМЕНЕНИЕ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ
В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ**

Ю.Н. Москвина, А.В. Крутских

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Москвина Ю.Н., Крутских А.В., 2024

Аннотация. В статье отмечено, что инновационной технологией получения информации об объекте строительства является наземное лазерное сканирование (НЛС). Указано, что метод позволяет сформировать данные для создания 3D-моделей, повысить качество строительной продукции на всех этапах ее создания, снизить производственные издержки и сократить сроки строительства. Рассмотрены особенности применения НЛС в строительстве, его преимущества и недостатки.

Ключевые слова: строительство, лазер, лазерные технологии, наземное лазерное сканирование.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-26-30

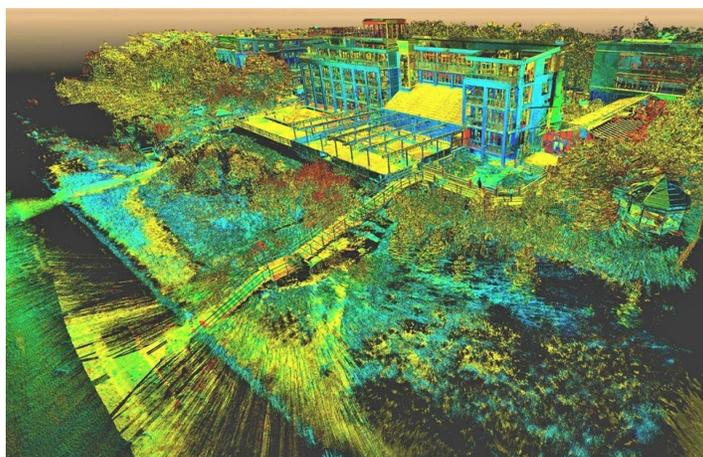
Разработка инновационных инструментов, в том числе с использованием лазера, связана с необходимостью совершенствования организационно-технологического уровня строительного производства, получением высокоточных геодезических измерений, развитием системы информационного моделирования строительных объектов, а также с рядом других аспектов.

Создание строительной продукции включает несколько этапов, на каждом из которых формируется и обрабатывается большое количество организационно-технической информации. В реализации проектов принимает участие большое количество организаций, деятельность и результаты работы которых должны быть увязаны между собой. Ошибки, допущенные в проектной документации и обнаруженные в ходе строительства, в дальнейшем приводят к увеличению сроков строительства и серьезным финансовым издержкам [1].

Значительно повысить эффективность строительства, сократить сроки, снизить производственные затраты позволяют информационные цифровые модели, а универсальным методом получения данных для моделирования объемных величин объекта является лазерное сканирование (ЛС) [2].

Принцип ЛС заключается в определении времени прохождения лазерного луча от излучателя до отражающей поверхности и обратно до приемника. Путем деления этого времени на скорость распространения лазерного луча устанавливается расстояние до объекта. Сканер состоит из лазерного дальномера, адаптированного для работы с высокой частотой, и блока лазерного луча. В качестве блока в сканере выступает сервопривод, а также зеркало либо призма. Во время работы для каждой сканируемой точки определяются три пространственные координаты, которые записываются в виде массива данных.

Кроме того, в состав современной сканирующей системы, наряду с самим лазерным сканером, также могут входить цифровые камеры, тепловизор и другие сенсоры, позволяющие проводить комплексное обследование для выполнения узкоспециализированных задач (рисунок).



Лазерное сканирование в системе LiDAR

Системы ЛС могут закрепляться неподвижно (наземный сканер), базироваться на транспортном средстве (мобильный) или устанавливаться на различные летательные аппараты (воздушный).

Выбор метода ЛС зависит от целей и особенностей объекта.

Наземное лазерное сканирование (НЛС) применяется для проведения топографической съемки сравнительно небольших объектов, отдельных зданий, высокоточных замеров, для формирования трехмерных моделей помещений, инженерных сооружений. Получение данных ведется дистанционно, что дает возможность производить работы в труднодоступных местах и обеспечивает их безопасность [3]. Данный метод позволяет выполнить съемку снаружи и внутри зданий.

Для сканирования больших площадных и протяженных линейных объектов используют метод воздушного ЛС, который обеспечивает данными об элементах объектов, измерение которых невозможно с помощью НЛС. Такой способ позволяет быстро и качественно снимать наклонно-горизонтальные поверхности площадных объектов, но фронтальные поверхности объектов снимаются значительно хуже [4].

Для линейно-протяженных объектов (а также в случае наличия беспилотных зон и отсутствия возможности использовать воздушный сканер) топографические данные получают методом мобильного ЛС. Съемку объектов проводят по направлению движения

транспортного средства. На производительность и качество работ влияет число помех по ходу движения сканера, а некоторые участки приходится снимать несколько раз.

В настоящее время НЛС является наиболее быстрым, точным и высокопроизводительным способом получения самой полной пространственной информации об объекте капитального строительства [5]. Применение этого метода началось в области реконструкции памятников архитектуры. Таким объектам свойственно наличие сложных элементов, которые невозможно представить набором простых геометрических примитивов [6].

В области архитектурного проектирования и реставрации ЛС применяется для создания 3D-моделей объектов с высокой степенью детализации, что в значительной степени упрощает процесс анализа состояния зданий и инфраструктуры, способствует более точному планированию строительных работ и работ по реконструкции. Кроме того, применение данной технологии позволяет на основе данных съемки проводить модернизацию объектов, создавать координацию между проектами и оптимизировать рабочие процессы [6].

В ходе строительства НЛС дает возможность получать оперативную информацию о геометрических характеристиках объекта и об осуществлении контрольных процедур, вести исполнительную съемку, определять объемы выполненных работ, своевременно выявлять отклонения от проектных данных и устранять их. Контроль исполнения проекта происходит автоматически путем загрузки данных ЛС в проектную среду [7].

Применение ЛС имеет и ряд недостатков. На качество и возможность съемки влияют условия проведения работ и геодезическая привязка сканера.

В ряде случаев сканирование не всегда экономически обосновано. Важной альтернативой для узконаправленных задач является использование традиционных инструментов геодезии, таких как тахеометры и нивелиры [8]. Высокая стоимость лазерных сканеров, программного обеспечения и необходимый требуемый уровень специалистов ограничивают применение ЛС. Из-за особенностей отражения лазерного пучка от стекла в некоторых случаях отсутствует возможность сканирования остекленных конструкций и фасадов [9]. Сканер с высоким уровнем мощности дает большее количество ошибочных измерений при сканировании неоднородных по текстуре и форме объектов, находящихся на небольшом расстоянии от него [10].

Лазерные технологии находят все более широкое применение в строительной отрасли. С их помощью можно проводить точные измерения объектов, создавать цифровые модели, делая строительство более эффективным. Активное использование лазерных технологий в сфере строительства открывает новые горизонты для инновационных подходов и оптимизации процессов. С каждым годом эта область продолжает активно развиваться, и будущее определяют те компании, которые могут результативно использовать лазерное оборудование в рабочих процессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ященко С.О., Сабитова Т.А., Карпова О.И., Соболева Е.Д., Соболев Д.А. Лазерные технологии в строительной отрасли: преимущества и недостатки // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 6. URL: <http://hivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8469> (дата обращения: 10.08.2024).

2. Хашпакянц Н.О., Грибкова И.С. Применение лазерного сканирования в землеустройстве и кадастрах. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30683349> (дата обращения: 10.08.2024).
3. Виды лазерного сканирования. URL: <https://geo-moon.ru/kazan/blog/vidyi-lazernogo-skanirovaniya> (дата обращения: 15.08.2024).
4. Семькин В. Воздушное, мобильное и наземное лазерное сканирование. URL: <https://acropol-geo.ru/o-texnologii/64-vozdushnoe,-mobilnoe-i-nazemnoe-lazernoe-skanirovanie> (дата обращения: 15.08.2024).
5. Гура Т.А., Сидеропуло Г.Р. Востребованность лазерного сканирования в процессе строительства и эксплуатации объектов. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vostrebovanost-lazernogo-skanirovaniya-v-protseesse-stroitelstva-i-ekspluatatsii-obektov?ysclid=m19bsduqnm467797317> (дата обращения: 18.08.2024).
6. Богданов А.Н., Алешутин И.А. Наземное лазерное сканирование в строительстве и ВМ-технологиях. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nazemnoe-lazernoe-skanirovanie-v-stroitelstve-i-vim-tehnologiyah?ysclid=m1ayv7wnbf965664001> (дата обращения: 19.08.2024).
7. Лазерное сканирование в интересах авторского надзора и контроля строительства. URL: <https://acropol-geo.ru/o-texnologii/119-kontrol-stroitelstva> (дата обращения: 21.09.2024).
8. Богданов А.Н., Листратов Я.А. Строительный контроль методом наземного лазерного сканирования // *Известия КазГАСУ*. 2019. № 4 (50). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/stroitelnyy-kontrol-metodom-nazemnogo-lazernogo-skanirovaniya> (дата обращения: 21.09.2024).
9. Кошанулы К.Е. Возможность, преимущества и недостатки наземного лазерного сканирования. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-preimuschestva-i-nedostatki-nazemnogo-lazernogo-skanirovaniya> (дата обращения: 21.09.2024).
10. Алтынцев А.М., Каркокли Х. Методика автоматизированной фильтрации данных мобильного лазерного сканирования. URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1727166845&tld=ru&lang=ru&name=2021_3.5-19.pdf. (дата обращения: 21.09.2024).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

МОСКВИНА Юлия Николаевна – кандидат философских наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: julim@yandex.ru
КРУТСКИХ Андрей Викторович – старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: mister.krutskih@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Москвина Ю.Н., Крутских А.В. Применение наземного лазерного сканирования в строительной отрасли // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 3 (23). С. 26–30.

**APPLICATION OF GROUND-BASED LASER SCANNING
IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY**

Yu.N. Moskvina, A.V. Krutskikh
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article notes that ground-based laser scanning (GLS) is an innovative technology for obtaining information about the construction site. It is indicated that the method allows you to generate data for creating 3D models, improve the quality of construction products at all stages of its creation, reduce production costs and shorten construction time. The features of the use of GLS in construction, its advantages and disadvantages are considered.

Keywords: construction, laser, laser technologies, ground-based laser scanning.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

MOSKVINA Yulia Nikolaevna – Candidate of Philosophical Sciences, Associate Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: julim@yandex.ru

KRUTSKIKH Andrey Viktorovich – Senior Lecturer at the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: mister.krutskih@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Moskvina Yu.N., Krutskikh A.V. Application of ground-based laser scanning in the construction industry // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 3 (23), pp. 26–30.

УДК 691-462; 691.714.018.8; 691-404

УСИЛЕНИЕ БАЛКИ ГИДРАВЛИКОЙ

В.Д. Павлов

Владимирский электромеханический завод (г. Владимир)

© Павлов В.Д., 2024

Аннотация. В статье исследованы вопросы повышения несущей способности трубчатых балок. Отмечено, что трубчатая балка с жидким наполнителем (гидравлическая балка) представляет собой заглушенную с обоих концов круглую трубу, полностью заполненную жидкостью; при нагружении гидравлической балки ее боковая поверхность может деформироваться, следовательно, внутренний объем трубы может уменьшаться, однако, поскольку жидкость несжимаема, она не допускает уменьшения объема, что препятствует деформации трубы. Указано, что в гидравлической балке вся нагрузка благодаря жидкости относительно равномерно распределяется по всей внутренней поверхности балки. Сделан вывод, что полости соседних гидравлических балок в силовой

конструкции, например в пролетном строении моста, могут быть выполнены сообщающимися (посредством усиленных патрубков), что позволяет равномерно перераспределять нагрузку, приложенную к части балок, между всеми гидравлическими балками несущей конструкции.

Ключевые слова: трубчатая балка, двутавровая балка, гидравлическая балка, жидкий наполнитель, полость.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-30-35

ВВЕДЕНИЕ

Наибольшей несущей способностью обладают двутавровые балки. Вместе с тем из-за широкого распространения и доступности трубопроката в практике нередко используют трубчатые балки. Сравнение данных балок по несущей способности следует проводить при условии их равной массы. Для этого хорошо подойдут двутавр по ГОСТ Р 57837-2017, масса погонного метра которого составляет 194 кг, и труба по ГОСТ 33228-2015, масса погонного метра которой равняется 194 кг.

Осевой момент сопротивления указанного двутавра

$${}^{i-b}W_x = 5\,625\text{ см}^3.$$

Осевой момент сопротивления указанной трубы

$${}^pW_x = 2\,950\text{ см}^3.$$

При этом

$$\frac{{}^{i-b}W_x}{{}^pW_x} = \frac{5\,625}{2\,950} \approx 1,9.$$

Таким образом, несущая способность двутавровой балки почти вдвое выше, чем трубчатой.

В настоящее время появились патенты [1–3] и журнальные публикации [4–6] о трубобетонных балках (в частности, с преднапряженной нижней частью бетонного ядра). Стальная труба в них играет роль экзоарматуры. Несущая способность подобных балок весьма значительна при их невысокой себестоимости и хорошей технологичности.

Цель настоящей работы – предложить метод повышения несущей способности трубчатых балок. При этом не имеется в виду, что они должны составлять конкуренцию двутавровым и трубобетонным балкам. Смысл здесь исключительно в расширении ассортимента строительных конструкций и повышении их эксплуатационных свойств.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Применяется методика геометрической оптимизации и мысленного эксперимента.

Идея использовать жидкий наполнитель для трубчатой балки связана с известным свойством жидкости – ее практической несжимаемостью.

Геометрическое длинномерное тело, боковая поверхность которого имеет прямолинейную образующую, обладает максимальным объемом (при заданной боковой поверхности), если его поперечное сечение имеет форму круга. Этому условию соответствует круглая труба.

Трубчатая балка с жидким наполнителем (далее – гидравлическая балка) представляет собой заглушенную с обоих концов круглую трубу, полностью (без воздушных полостей) заполненную жидкостью [7]. Объем жидкости уменьшаться не может, что обуславливает неизменность формы трубы.

Если рассмотреть гидравлическую балку, к примеру, прямоугольного сечения, то при ее изгибе давление жидкости возрастает, прямоугольный профиль трансформируется в округлый, а площадь профиля увеличивается. Это может привести к недопустимому прогибу балки.

Другими словами, в гидравлической балке прямоугольного сечения уменьшение внутреннего объема, вызванное прогибом, компенсируется увеличением объема, связанным с трансформацией профиля (суммарный объем несжимаемой жидкости остается неизменным). Чем больше прямоугольный профиль будет трансформироваться в круглый, тем больше будет прогиб. У круглой трубы нет такого «резерва» и возможности для трансформации профиля и увеличения площади поперечного сечения, следовательно, нет и подобного «резерва» увеличения внутреннего объема. Таким образом, исключена и возможность уменьшения внутреннего объема, вызванного прогибом, поскольку суммарный объем жидкости изменяться не может. В идеализированном варианте прогиб круглой гидравлической балки исключается.

Наглядной демонстрацией идеи гидравлической балки может служить простой пример из бытовой практики. Если пустой расправленный матерчатый мешок (аналог балки) положить на два стула (аналог опор), то он под действием собственного веса прогнется и провалится между ними. Если этот же мешок плотно заполнить (например, керамзитом) и завязать его, то он не только не провалится между стульями, но и сможет выдержать дополнительную существенную нагрузку.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пусть при сверхпредельном нагружении круглой трубчатой балки (не гидравлической), приводящем к выходу ее из строя, пластической деформации подвергается часть поверхности трубы, равная s . Вся площадь поверхности трубы равна S . Сила нагружения – F^* .

В самом первом приближении, достаточном для предварительной оценки, предельное напряжение в деформированных участках поверхности трубы

$$\sigma^* = \frac{F^*}{s}.$$

В гидравлической балке вся нагрузка благодаря жидкости относительно равномерно распределяется по всей внутренней поверхности балки. (Это происходит в соответствии с законом Паскаля: давление, производимое на жидкость или газ, передается в любую точку без изменений во всех направлениях.) При этом давление на внутреннюю поверхность трубы, если не брать во внимание площадь концевых заглушек (ввиду грубости приближений):

$$p = \frac{F^*}{S}.$$

Из этого очевидным образом следует, что

$$q = \frac{\sigma^*}{p} = \frac{S}{s}.$$

Другими словами, в первом приближении несущая способность гидравлической балки выше, чем у трубчатой, в q раз.

Согласно некоторым экспертным оценкам, при разрушении трубчатой балки пластической деформации подвергается порядка десяти процентов поверхности трубы.

Пусть для определенности

$$q \approx 10.$$

Это означает, что несущая способность гидравлической балки примерно в десять раз выше, чем трубчатой, и примерно в пять раз выше, чем двутавровой.

В случае плоских концевых заглушек места их сварки с трубой являются сильным концентратором напряжений. В связи с этим, а также на основе соображений геометрической оптимизации можно сказать, что наилучшей формой концевых заглушек является полусфера.

Полости соседних гидравлических балок в силовой конструкции (например, в пролетном строении моста) могут быть выполнены сообщающимися (посредством усиленных патрубков). Это позволяет равномерно перераспределять нагрузку, приложенную к части балок, между всеми гидравлическими балками несущей конструкции.

Действительно, суммарная «рабочая» площадь всех гидравлических (сообщающихся) балок увеличивается кратно их количеству, и давление в балках можно выразить как

$$p = \frac{F}{nS},$$

где n – количество сообщающихся гидравлических балок. Соответственно, в n раз увеличивается несущая способность.

В качестве жидкого наполнителя гидравлических балок во многих случаях следует использовать незамерзающие жидкости. В целях их экономии внутренние полости гидравлических балок могут частично заполняться твердым дисперсным материалом (например, керамическим ломом, щебнем и т.п.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Привлекательность железобетонных балочных конструкций состоит в замещении металла [8–10]. В этом же заключается привлекательность рассмотренной гидравлической балки.

Приведенные ранее расчеты несущей способности являются грубым приближением.

В случае практического использования гидравлических балок потребуются более обстоятельные инженерные исследования, включая учет площади поверхности концевых заглушек, различий между давлением и напряжением (например, напряжением смятия), а также учет упругой деформации стенок, собственного веса жидкости и других факторов. При этом полученная выше оценка, состоящая в пятикратном превышении несущей способности гидравлической балки по сравнению с двутавровой и в десятикратном по сравнению с трубчатой, может быть скорректирована как в меньшую, так и в большую сторону.

При использовании сообщающихся гидравлических балок можно добиться несопоставимого повышения несущей способности пролетных конструкций (в соответствии с формулой $p = \frac{F}{nS}$).

Преимущество гидравлической балки перед всеми другими типами балок состоит в том, что в отличие от них у гидравлической балки «работает» (в одинаковой мере) весь материал, из которого она изготовлена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ 2675273. *Труبوبетонная балка* / Парышев Д.Н., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., Овчинников И.Г., Харин В.В., Овчинников И.И., Харин А.В., Попов И.П., Воронкин В.А.; Заявл. 22.12.2017. Оpubл. 18.12.2018. Бюл. № 35.
2. Патент РФ 2702444. *Пролетное труبوبетонное строение моста* / Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., Мосин А.А., Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Харин В.В., Попов И.П., Харин А.В., Воронкин В.А.; Заявл. 06.02.2019. Оpubл. 08.10.2019. Бюл. № 28.
3. Патент РФ 2739271. *Битруبوبетонная балка* / Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., Агафонов Ю.А., Овчинников И.Г., Шеренков В.М., Овчинников И.И., Харин В.В., Харин Д.А., Воронкин В.А., Попов И.П.; Заявл. 25.09.2019. Оpubл. 22.12.2020. Бюл. № 36.
4. Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Овчинников И.Г., Овчинников И.И., Моисеев О.Ю., Копырин В.И., Харин В.В., Попов И.П., Воронкин В.А. Применение труبوبетона в транспортном строительстве // *Дорожная держава*. 2019. № 90. С. 74–80.
5. Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Моисеев О.Ю., Харин В.В., Попов И.П., Харин Д.А. Труبوبетонная балка с содержанием фибры в бетонном ядре // *Естественные и технические науки*. 2019. № 8. С. 189–195.
6. Овчинников И.Г., Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Моисеев О.Ю., Харин В.В., Попов И.П., Харин Д.А. Повышение нагрузочной способности труبوبетонной балки // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2019. № 4. С. 58–66.
7. Патент РФ 2724653. *Гидравлическая балка* / Попов И.П., Парышев Д.Н., Ильтяков А.В., Копырин В.И., Моисеев О.Ю., Овчинников И.И., Харин В.В., Харин А.В., Воронкин В.А.; Заявл. 20.06.2019. Оpubл. 25.06.2020. Бюл. № 21.
8. Маклакова С.Н., Галкина М.А., Бровкин В.Н. Анализ методов испытаний образцов строительных материалов из бетона // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 2 (14). С. 15–20.
9. Баркая Т.Р., Субботин С.Л., Гавриленко А.В., Казимиров С.И. Особенности моделирования железобетонных элементов при поэтапном создании постнапряжения // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 3 (15). С. 5–11.
10. Черемных С.В. Модель механики разрушения железобетона // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2022. № 1 (13). С. 28–38.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ПАВЛОВ Валентин Дмитриевич – кандидат технических наук, начальник научно-информационного отдела, Владимирский электромеханический завод, 600901, Россия, г. Владимир, ул. Ноябрьская, д. 127. E-mail: pavlov.val.75@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Павлов В.Д. Усиление балки гидравликой // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 3 (23). С. 30–35.

STRENGTHENING THE BEAM WITH HYDRAULICS

V.D. Pavlov

Vladimir Electromechanical Plant (Vladimir)

Abstract. The paper investigates the issues of increasing the load-bearing capacity of tubular beams. It is noted that a tubular beam with liquid filler (hydraulic beam) is a round tube plugged at both ends, completely filled with liquid; when the hydraulic beam is loaded, its lateral surface can be deformed, therefore, the internal volume of the tube can decrease, but since the liquid is incompressible, it does not allow volume reduction, which prevents deformation of the tube. It is pointed out that in the hydraulic beam, the entire load due to the fluid is relatively uniformly distributed over the entire inner surface of the beam. It is concluded that the cavities of neighboring hydraulic beams in a power structure, for example in a bridge span, can be made communicating (by means of reinforced spigots), which allows uniform redistribution of the load applied to a part of the beams between all hydraulic beams of the supporting structure.

Keywords: tubular beam, I-beam, hydraulic beam, liquid filler, cavity.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

PAVLOV Valentin Dmitrievich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Scientific and Information Department, Vladimir Electromechanical Plant, 127, Noyabrskaya st., Vladimir, 600901, Russia. E-mail: pavlov.val.75@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Pavlov V.D. Strengthening the beam with hydraulics // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 3 (23), pp. 30–35.

УДК 691.335

**СИНТЕЗ ФОСФОГИПСОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ
С АЛЮМОСИЛИКАТНОЙ НАНОСФЕРОЙ**

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

© Петропавловская В.Б., Козлова К.А.,
Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б., 2024

Аннотация. В статье рассмотрены перспективы использования фосфогипса, побочного продукта производства фосфорных удобрений, для создания гипсовых вяжущих и строительных материалов. Исследовано влияние алюмосиликатной наносферы на физико-механические свойства материалов. Установлено, что оптимальное содержание алюмосиликатных добавок в композиции приводит к увеличению прочности материала и снижению его средней плотности. Результаты исследования могут быть использованы при разработке новых материалов с улучшенными техническими характеристиками в целях последующего их применения в строительстве и других отраслях. Подчеркнута значимость использования фосфогипсовых отходов и алюмосиликатной наносферы при создании экологически чистых и эффективных строительных материалов, а также важность утилизации промышленных отходов для повышения экономической эффективности производства.

Ключевые слова: фосфогипс, алюмосиликатный компонент, наносфера, переработка, прочность, плотность.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-36-42

ВВЕДЕНИЕ

В мире ежегодно добывается около 100 млн т гипсовой породы. Одновременно в качестве побочных продуктов производится около 150 млн т синтетического гипса, а из этого количества – больше 100 млн т химического (в первую очередь фосфогипса), а также около 35 млн т гипса в результате очистки дымовых газов от серы [10].

Гипсосодержащие отходы являются побочным продуктом различных промышленных предприятий. Из-за своих особенностей данное сырье по большей части складывается в отвалах и оказывает негативное воздействие на экологическую обстановку регионов [12]. Отходы, содержащие гипс, можно классифицировать в зависимости от примесей, присутствующих в них, а основной составляющей всегда выступает дигидрат сульфата кальция. Такие гипсосодержащие отходы, как фосфогипс и борогипс, годовой выход которых составляет более 20 млн т, используются для получения на их основе гипсовых вяжущих и строительных изделий (гипсовых блоков, стеновых перегородок) [7]. В рамках настоящей статьи рассмотрим самый популярный и первый по складированию материал – фосфогипс (ФГ).

Фосфогипс – это побочный продукт, образующийся при производстве фосфорных удобрений (фосфорной кислоты). Фосфогипс по минеральному составу представляет собой дигидрат сульфата кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), составляющий более 90 %, и может

позиционироваться как альтернатива природному гипсовому камню. Он содержит некоторые примеси, такие как водорастворимый фосфат (P_2O_5), водорастворимый фторид (F-) и оксид фосфора (P_2O_5), замещенный в кристаллической решетке гипса [2, 9].

Среди гипсосодержащих отходов ФГ занимает первое место по объему производства. Это обусловлено тем, что добыча и переработка фосфатов осуществляются во многих отраслях.

В настоящее время есть несколько методов производства гипсовых вяжущих из фосфогипса. Одним из них является обжиг фосфогипсовых отходов с добавлением алюмокремнеземистых материалов. Данный способ делает возможным применение фосфогипса в дорожном строительстве. Кроме того, существует способ получения гипсовых вяжущих из фосфополугидрата сульфата кальция с помощью дегидратнополугидратного метода [4, 14].

Имеется и еще один способ переработки фосфогипса – добыча из него коллективного оксида редкоземельных металлов (P_3M), разделение на отдельные оксиды и извлечение непосредственно металла. Все компоненты могут быть извлечены из ФГ с получением экологически чистой гашеной извести или безводного гипса [4, 5].

Перспективны технологии переработки ФГ без его предварительной очистки и с использованием примесей, выступающих активными компонентами строительных композиций. Для нейтрализации фосфогипсовых отходов наиболее эффективной добавкой является гашеная известь. В процессе нейтрализации фосфогипсовых отходов она связывает остатки ортофосфорной кислоты и соединений фтора в труднорастворимые соединения. При введении в фосфогипсовые композиции 2–3 % извести вредные примеси связываются и практически не могут оказывать вредное воздействие на окружающую среду и здоровье людей, что подтверждается санитарно-гигиеническими исследованиями [3, 6, 8].

Алюмосиликатная наносфера представляет собой легкую фракцию золы, которая образуется при высокотемпературном сжигании угля на факелах. Это сыпучий материал, состоящий из стеклокерамических полых частиц сферической формы диаметром до 0,1 мкм. Использование наносфер в качестве наполнителя обусловлено рядом преимуществ: высокая дисперсность способствует созданию однородных структур; в наличии такие важные характеристики, как низкая плотность, повышенная термостабильность и стойкость в агрессивных средах [1, 13].

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью поиска новых эффективных материалов с улучшенными техническими характеристиками в целях применения в строительстве, промышленности и других отраслях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для установления целесообразности применения алюмосиликатной наносферы совместно с фосфогипсовыми композициями были проведены физико-механические испытания, в частности испытания на определение прочности на изгиб и средней плотности.

В качестве основного компонента композиционного вяжущего был взят фосфогипсовый порошок (дигидрат сульфата кальция) с Воскресенского завода минеральных удобрений (рис. 1). Средняя плотность порошка фосфогипса-дигидрата – 950–1 000 кг/м³; дисперсность порошка фосфогипса-дигидрата, определенная по методу воздухопроницаемости, – 200–450 м²/кг.

Структурообразующей добавкой стало гипсовое вяжущее марки Г-5 А II (Нижегородская область), оно имеет водопотребность 60–65 %, по срокам схватывания отвечает требованиям ГОСТ 125 «Вяжущие гипсовые. Технические условия», является быстротвердеющим (начало схватывания – 5,5 мин, конец – 8,5 мин).

В качестве алюмосиликатной добавки в исследовании использовалась зола угольной электростанции (Московская область) с фракцией до 0,1 мкм (рис. 2). Структура алюмосиликатной добавки представлена стеклофазой.



Рис. 1. Фосфогипс



Рис. 2. Алюмосиликатная добавка

Исследуемые составы композиционного гипсового вяжущего оценивались по результатам испытаний образцов-балочек с размерами $40 \times 40 \times 160$ мм (рис. 3), изготовленных литьевым способом. Твердение образцов осуществлялось в воздушно-сухих условиях при температуре (22 ± 2) °С в течение 14 сут. Испытания физико-механических свойств – пределов прочности при изгибе – проводились согласно требованиям ГОСТ 23789-2018.



Рис. 3. Фосфогипсовые образцы

Первый этап исследования включал изучение влияния алюмосиликатной наносферы на прочность на изгиб фосфогипсовых образцов. Результаты представлены на рис. 4.

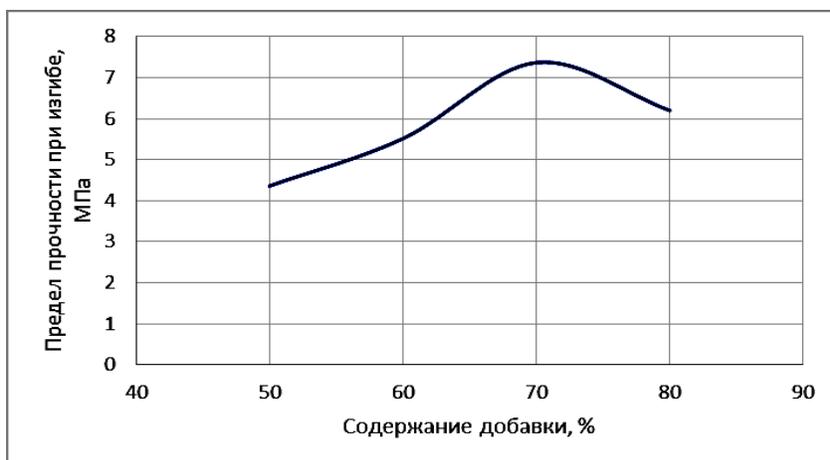


Рис. 4. Зависимость предела прочности при изгибе фосфогипсовых образцов от содержания алюмосиликатной добавки

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования показали, что в пределах от 50 до 70 % добавки происходит значительный рост прочности материала. Этот эффект обусловлен участием алюмосодержащего компонента в процессах формирования структуры гидросульфоалюминатов кальция. Он подтверждает выводы авторов работы [11] о том, что микро- и нанодисперсные наполнители в составе минеральных вяжущих посредством формирования наиболее плотных упаковок частиц и увеличения количества контактов способствуют повышению прочности получаемого камня.

Превышение оптимального содержания добавки более чем на 70 % приводит к обратному эффекту – падению прочности материала. Данный факт говорит о необходимости соблюдения приемлемых пропорций при добавлении алюмосиликатных компонентов для достижения желаемых свойств материала.

На втором этапе проводилось исследование влияния алюмосиликатной наносферы на среднюю плотность фосфогипсовых образцов. Результаты представлены на рис. 5.

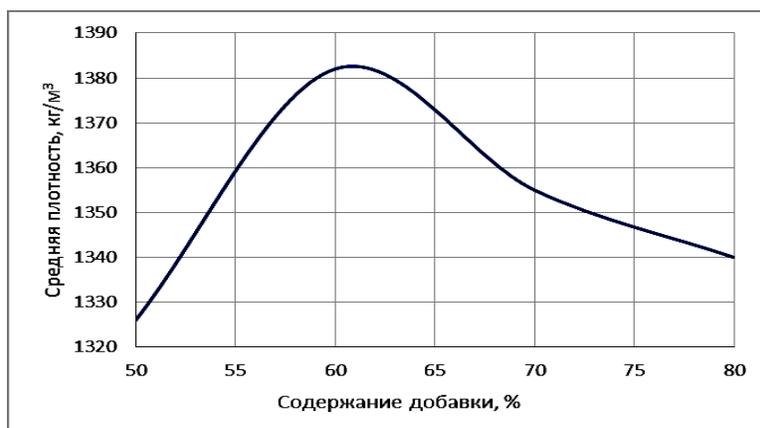


Рис. 5. Зависимость средней плотности фосфогипсовых образцов от содержания алюмосиликатной добавки

Изучение средней плотности фосфогипсового камня показало, что образцы с добавлением 50 % алюмосиликатного компонента имеют наименьшую среднюю плотность – 1 327 кг/м³. При добавлении 60 % данного компонента средняя плотность растет до 1 382 кг/м³ и достигает максимального значения. В ходе дальнейшего увеличения процентного содержания добавки плотность фосфогипсового камня уменьшается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе проведенных исследований было установлено, что введение оптимального количества алюмосиликатной наносферы положительно влияет на такие свойства, как прочность на изгиб и плотность.

Полученные данные могут быть использованы при разработке новых составов материалов с оптимальными свойствами для решения конкретных задач в строительстве и других областях. Утилизация фосфогипсовых отходов в качестве замены основной части гипсового вяжущего при производстве строительной продукции повышает экономическую эффективность. Исследования в данной области продолжаются.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-49-03004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miryuk O., Fediuk R., Amran M. Porous Fly Ash/Aluminosilicate Microspheres-Based Composites Containing Lightweight Granules Using Liquid Glass as Binder // *Polymers*. 2022. № 14 (17), P. 3461.
2. Rashad A.M. Phosphogypsum as a Construction Material // *Journal of Cleaner Production*. 2017. № 166. P. 732–743.
3. Абраменко А.А. Строительные материалы на основе фосфогипса // *Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Высокие технологии. Экология*. 2017. №. 1. С. 65–70.
4. Абраменко А.А., Буймарова Т.К., Соловьева Е.А. Энергоэффективная комплексная технология переработки фосфогипса // *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии: Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции*. М.: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2018. С. 618–621.
5. Бабаев М.Б., Келова М.Г. Комплексная переработка отходов фосфогипса. *Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология: Сборник докладов Международной научной конференции*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. С. 108–184.
6. Булатов Б.Г. Особенности выбора наиболее рациональной технологии производства стеновых и перегородочных изделий на основе природного гипса и гипсосодержащих отходов в современных условиях // *Эксперт: теория и практика*. 2023. № 1 (20). С. 51–54.
7. Коннова Л.С. Использование промышленных отходов в технологии строительных материалов. Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. *Строительные технологии: Сборник статей*. Самара: СГАСУ, 2015. С. 87–91.

8. Левицкая К.М. Направление использования фосфогипса в строительном материаловедении. *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова: Сборник докладов*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. Ч. 4. С. 99–104.
9. Левицкая К.М., Алфимова Н.И., Бурьянов А.Ф. Использование сырья для производства однокомпонентных вяжущих // *Региональная архитектура и строительство*. 2024. № 1. С. 82–98.
10. Петропавловская В.Б., Белов В.В., Новиченкова Т.Б., Бурьянов А.Ф., Полеонова Ю.Ю., Петропавловский К.С. Ресурсосберегающие безобжиговые гипсовые композиты // *Строительные материалы*. 2015. № 6. С. 79–81.
11. Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю. Гипсовые дисперсно-армированные композиции с добавочным комплексом на основе техногенных отходов // *Эксперт: теория и практика*. 2023. № 1 (20). С. 106–110.
12. Пиреева С.Ю. Способы синтеза гипсовых вяжущих из гипсосодержащих отходов различных производств. *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: Материалы конференции*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. С. 3128–3132.
13. Салиева М.Г. Некоторые аспекты использования золы гидроудаления в строительной индустрии // *Материаловедение*. 2019. № 2 (30). С. 101–103.
14. Яглов В.Н., Меженцев А.А., Бурак Г.А., Способы переработки фосфогипса. *Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования: Материалы V Национальной научно-практической конференции с международным участием, приуроченной ко Дню российской науки*. Астрахань: ГАОУ АО ВО, 2022. Т. 5. С. 72–75.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

КОЗЛОВА Кристина Андреевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: kozlova.kristina2017@yandex.ru

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

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Петропавловская В.Б., Козлова К.А., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б. Синтез фосфогипсовых композиций с алюмосиликатной наносферой // *Вестник Тверского*

государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 3 (23). С. 36–42.

SYNTHESIS OF PHOSPHOGYPSUM COMPOSITIONS WITH ALUMINOSILICATE NANOSPHERE

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

Abstract. The article considers the prospects of using phosphogypsum, a by-product of phosphorus fertilizers production, to create gypsum binders and building materials. The influence of aluminosilicate nanosphere on physical and mechanical properties of materials is investigated. It was found that the optimal content of aluminosilicate additives in the composition leads to an increase in the strength of the material and a decrease in its average density. The results of the study can be used in the development of new materials with improved technical characteristics for their subsequent application in construction and other industries. The significance of the use of phosphogypsum waste and aluminosilicate nanosphere in the creation of environmentally friendly and efficient building materials is emphasized, as well as the importance of industrial waste utilization to improve the economic efficiency of production.

Keywords: phosphogypsum, aluminosilicate component, nanosphere, processing, strength, density.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

PETROPAVLOVSKAYA Viktoriya Borisovna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

KOZLOVA Kristina Andreevna – Master's Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kozlova.kristina2017@yandex.ru

PETROPAVLOVSKII Kirill Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: kspetropavlovsky@gmail.com

NOVICHENKOVA Tatiana Borisovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tanovi.69@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Petropavlovskaya V.B., Kozlova K.A., Petropavlovskii K.S., Novichenkova T.B. Synthesis of phosphogypsum compositions with aluminosilicate nanosphere // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 3 (23), pp. 36–42.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 44.31.03:53.07.00:45.43.00

**РАСЧЕТ ПОТОКОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДУГ
ПО ПОВЕРХНОСТИ ВАННЫ И СТЕН
ВЫСОКОМОЩНЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ.
ЧАСТЬ II. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДУГ
ПО ПОВЕРХНОСТИ СТЕН***А.Н. Макаров**Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2024

Аннотация. В статье рассчитано распределение тепловых потоков излучения коротких дуг по ванне металла. Указано, что при работе на коротких дугах тепловое излучение дуг не достигает откосов и расплавление шихты на них осуществляется путем теплопроводности и конвекции из шаровых сегментов под дугами в ванне; с ростом заглубления дуг в шлак тепловые потоки излучения дуг на стены снижаются в 3–4 раза. Отмечено, что расчетные и экспериментальные данные по тепловым потокам излучения дуг на водоохлаждаемые панели стен совпадают.

Ключевые слова: сталь, печь, электрическая дуга, ванна металла, теплообмен, тепловое излучение, теплопроводность, конвекция.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-43-51**ВВЕДЕНИЕ**

Тепло, поступающее при излучении от электрических дуг на поверхность шарового сегмента [1–4], нагревает ее и от поверхности передается соседним слоям металла и шлака за счет теплопроводности и конвекции, интенсифицируемой электродинамическим выдуванием дуг от осей к периферии электродов. При электродинамическом перемещении дуг от осей к периферии электродов дуги выбрасывают далеко от осей электродов из шаровых сегментов жидкий металл и шлак [1–6], поступающие в сегмент под действием архимедовой гидростатической подъемной силы, создавая таким образом их мощный конвективный теплообмен. При полном погружении дуг в шлак его количество, участвующее в конвективном теплообмене, увеличивается, конвективный тепловой поток на ванну металла и шлак возрастает, КПД дуг достигает максимального значения 78–80 % [7, 8]. Коэффициент полезного действия дуг – это отношение их полезной мощности, идущей на расплавление шихты, нагрев жидкого металла и шлака, к мощности дуг. Методика и результаты расчета КПД дуг подробно изложены в источниках [9, 10]. Необходимо рассчитать результаты распределения плотностей потоков тепловых излучений коротких дуг по ванне и исследовать взаимосвязь длины дуг, высоты слоя шлака, КПД дуг и удельного расхода электроэнергии в высокомоощных дуговых сталеплавильных печах.

РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ КОРОТКИХ ДУГ НА ВАННУ МЕТАЛЛА

По методике, изложенной в работе [10], рассчитали плотности потоков тепловых излучений коротких дуг, падающих на поверхность ванны печи ДСП-100. В расчетах принимали длину дуг 256 мм, высоту слоя шлака – 143 и 256 мм. Остальные параметры дуг и печи ДСП-100 приведены в источнике [7]. Результаты расчета распределения плотностей потоков тепловых излучений коротких дуг длиной 256 мм по диаметру ванны даны на рис. 1, где графики 1 и 2 характеризуют распределение плотностей потоков при высоте заглибления дуг 143 мм в прозрачной 1 и поглощающей 2 атмосфере печи. Графики 3 и 4 характеризуют распределение плотностей потоков при высоте заглибления дуг 256 мм в прозрачной 3 и поглощающей 4 атмосфере печи.

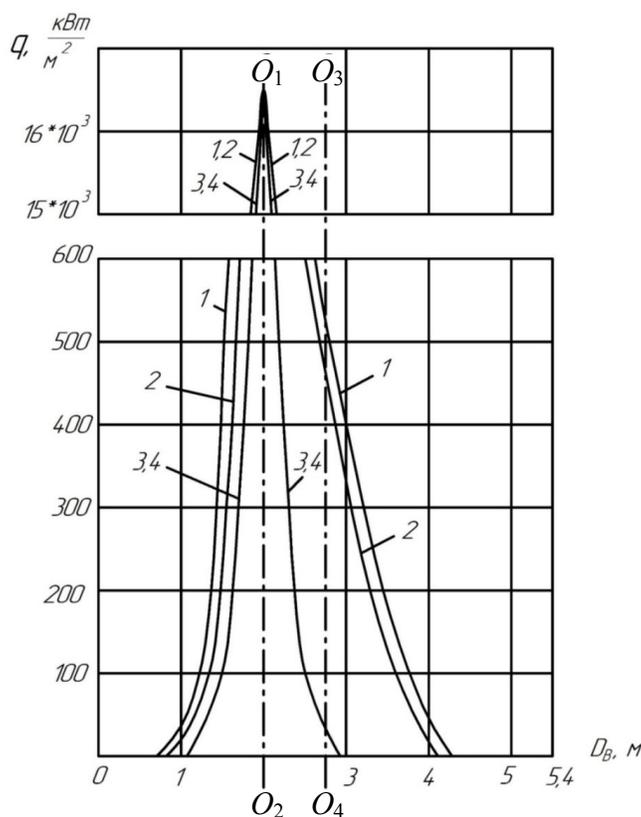


Рис. 1. Распределение плотностей потоков тепловых излучений коротких дуг по диаметру ванны: $\ell_D = 256$ мм при $h_3 = 143$ мм в прозрачной (1), поглощающей (2) атмосфере печи; при $h_3 = 256$ мм в прозрачной (3) и поглощающей (4) атмосфере печи (графики 3, 4 совпали); O_1O_2 – ось электрода; O_3O_4 – ось ванны

Как видно из рис. 1, при работе на коротких дугах их тепловое излучение практически не достигает откосов, поэтому расплавление шихты на последних осуществляется за счет теплопроводности от поверхности ванны, теплопроводности и конвекции из шаровых сегментов, образуемых электромагнитным давлением дуг в ванне металла и шлаке, а также за счет тепла факелов газокислородных горелок, рафинировочных кислородных горелок, инжекторов углеродосодержащего порошка, устанавливаемых в стенах по периферии ванны.

При высоте заглибления дуг в металл и шлак, составляющей 143 мм, тепловые потоки излучения дуг в поглощающей среде на участки ванны напротив дуг составляют следующие значения: на расстоянии 1 м от стены – 12 кВт/м²; 1,66 м от стены – 295 кВт/м²; 2 м от стены (под дугой) – 16,56 МВт/м². Тепловые потоки на участки ванны между дугами составляют значения: на расстоянии 1 м от стены – 0 кВт/м²; 1,66 м от стены – 20 кВт/м²; 2 м от стены – 225 кВт/м². Тепловые потоки, падающие на участки ванны, расположенные напротив дуг, превосходят тепловые потоки, падающие на участки ванны, расположенные между дугами, в следующее количество раз: на расстоянии 1 м от стен – в 12 раз; 1,66 м от стен – в 15 раз; 2 м от стен – в 74 раза. Таким образом, при работе высокоомощных дуговых сталеплавильных печей как на длинных ($\ell_d = 425$ мм), так и на коротких ($\ell_d = 256$ мм) дугах сохраняется значительная неравномерность распределения плотностей потоков тепловых излучений по ванне: тепловые потоки на участки ванны, расположенные напротив дуг, в 6–74 раза превосходят тепловые потоки на участки ванны, расположенные между дугами. Такое распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по ванне приводит к ускоренному расплавлению шихты на откосах напротив дуг и замедленному расплавлению шихты на откосах между дугами. Для выравнивания тепловых потоков и скорости расплавления шихты на периферии ванны устанавливают газокислородные горелки в водоохлаждаемых панелях стен (как правило, между дугами).

График 1 (см. рис. 1) повторяет график 2, однако значение плотностей потоков в лучепрозрачной среде превосходит значение плотностей потоков на те же расчетные площадки в поглощающей среде на 20–60 %. На рис. 1 (графики 3, 4) приведены результаты расчетов распределения плотностей потоков тепловых излучений дуг по поверхности ванны при их полном погружении в шлак ($h_3 = 256$ мм). Во время погружения дуги практически не излучают на поверхность ванны, но при этом излучают тепло на поверхность шаровых сегментов в ванне металла и шлаке. Тепло из шаровых сегментов ванне металла и шлаку передается за счет теплопроводности и интенсивного конвективного теплообмена. На дуги действуют аксиальные и радиальные электромагнитные силы. Аксиальные силы вызывают электромагнитное давление дуг на ванну металла и шлак, создавая в них заглибления в виде шаровых сегментов, а радиальные вызывают горизонтальные перемещения электрических дуг от оси электродов к поверхности ванны. В процессе перемещения дуги захватывают жидкий металл и шлак из шаровых сегментов и выбрасывают их далеко на поверхность шлака. Под действием архимедовой гидростатической подъемной силы новые слои жидкого металла и шлака поступают в шаровой сегмент, и процесс электромагнитного выбрасывания, перемешивания металла, шлака повторяется, конвективный теплообмен металла, шлака интенсифицируется, КПД дуг возрастает.

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛИННЫХ ДУГ ПО ПОВЕРХНОСТИ СТЕН

Для анализа взаимосвязи теплообмена, высоты слоя шлака, длины и КПД дуг, а также удельного расхода электроэнергии рассчитали распределение потоков тепловых излучений дуг длиной 425 мм по высоте стен при различном заглиблении. Результаты экспериментальных исследований тепловых нагрузок на своды печей ДСП-100 приведены в работе [1]. В источнике [7] указаны результаты исследования влияния высоты слоя шлака на КПД дуг, а также его влияния на распределение плотностей потоков тепловых

излучений дуг по поверхности стен дуговых сталеплавильных печей. При этом в работе [7] отсутствуют результаты расчетов распределения плотностей потоков тепловых излучений дуг длиной 425 мм по поверхности стен печи ДСП-100 при полном погружении дуг в ванну металла и шлак, т.е. при $h_3=425$ мм. Выполним данные расчеты. Параметры высокоомощной печи ДСП-100 и ее дуг приведены в источниках [7, 8]. На рис. 2 отражены необходимые построения для расчетов плотностей потоков тепловых излучений дуг на водоохлаждаемые панели стен печи ДСП-100.

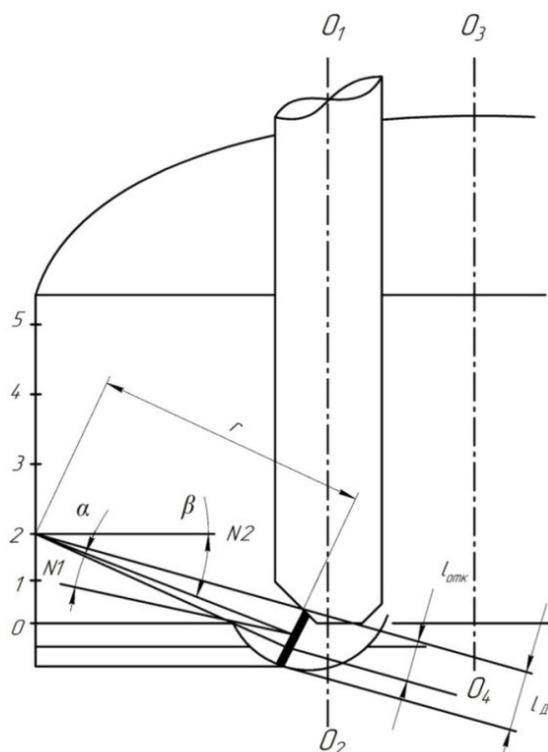


Рис. 2. Схема для расчета потоков тепловых излучений дуг на стены дуговой сталеплавильной печи:

- $0-5$ – расчетные площадки на поверхности стен, расположенные напротив дуг;
- N_1, N_2 – перпендикуляры к оси дуги и расчетной площадке соответственно;
- $l_d, l_{отк}$ – длина дуги и открытой части дуги соответственно, м;
- α, β – углы между лучом r , являющимся кратчайшим расстоянием от расчетной площадки до середины открытой части дуги, и N_2 и N_1 соответственно, град;
- O_1O_2, O_3O_4 – оси электрода и печи соответственно

Построения и расчеты выполнены в программах AutoCAD и Excel.

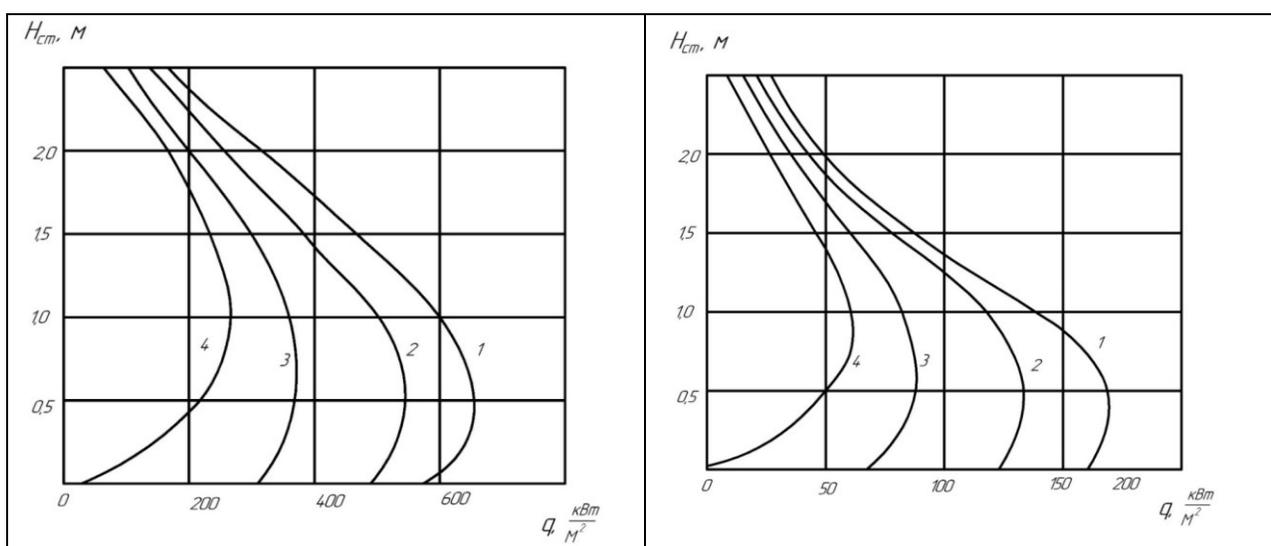
Плотность потока теплового излучения каждой из трех дуг, падающего на расчетную площадку на поверхности стен печи ДСП-100, определяли по первому закону теплового излучения газовых объемов дуг [10]:

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

где $\varphi_{ДФ}$ – локальный угловой коэффициент излучения электрической дуги на расчетную площадку, имеющую площадь F , $\varphi_{ДФ}$ определяется по таблицам [5]; $\alpha_{ст} = 0,92$ [10]; $P_{Д}$ – мощность дуги, $P_{Д} = 18$ МВт; k – коэффициент поглощения пылегазовой атмосферы печи, $k = 0,7$ [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ДУГ ПО ПОВЕРХНОСТИ СТЕН

Результаты расчета распределения плотностей потоков тепловых излучений от трех дуг по высоте стен печи ДСП-100 на участках, расположенных напротив дуг, представлены на рис. 3 для прозрачной (рис. 3а) и поглощающей (рис. 3б) атмосферы печи. На графиках показано распределение по высоте стен плотностей потоков тепловых излучений дуг длиной 425 мм, заглубленных в жидкий металл и шлак на высоту 70, 160, 300 и 425 мм. Как видно из рис. 3а, с ростом заглубления дуг в шлак максимальные потоки теплового излучения дуг на участки стен, расположенные на высоте 0,5 м, уменьшаются с 650 кВт/м² при $h_3 = 70$ мм до 262 кВт/м² при $h_3 = 425$ мм в лучепрозрачной среде и с 165 кВт/м² при $h_3 = 70$ мм до 63 кВт/м² при $h_3 = 425$ мм в поглощающей среде, т.е. в 2,5–2,6 раза.



а

б

Рис. 3. Распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по высоте стен печи на участках стен, расположенных напротив дуг: $l_{Д} = 425$ мм при $h_3 = 70$ мм (1); $h_3 = 160$ мм (2); $h_3 = 300$ мм (3); $h_3 = 425$ мм (4); а – прозрачная атмосфера печи; б – поглощающая

Чем выше расположены расчетные площадки на поверхности стен, тем меньше плотность потоков тепловых излучений дуг на площадки. Плотность тепловых потоков

излучений дуг при их незначительном заглублении, составляющем 70 мм (см. рис. 3а, кривая 1), на высоте 0,5 м равна 650 кВт/м^2 , а на высоте 2,5 м (под сводом) – 175 кВт/м^2 , т.е. в 3,7 раза меньше. Такая большая разница плотностей тепловых потоков излучений дуг в нижней и верхней частях стен объясняется тем, что, например, расстояние r от дуг, расположенных напротив стен, возрастает для площадок на высотах 0,5 и 2,5 м с 1,9 до 2,8 м соответственно, т.е. в 1,5 раза, а плотность потоков тепловых излучений дуг, рассчитанная по вышеуказанной формуле, уменьшается пропорционально квадрату расстояния r , т.е. в 2,25 раза. Кроме того, для расчетной площадки 5 увеличиваются углы α и β , а косинусы углов уменьшаются в 1,45 раза, что приводит к суммарному снижению плотностей потоков тепловых излучений от трех дуг на стены на высоте 2,5 м в 3,7 раза по сравнению с тепловыми потоками на высоте 0,5 м.

При заглублении дуг длиной 425 мм в ванну и шлак максимальная плотность потоков их тепловых излучений на высоте 0,5 м снижается с 650 кВт/м^2 при $h_3 = 70 \text{ мм}$ до следующих значений: 545 кВт/м^2 при $h_3 = 160 \text{ мм}$; 370 кВт/м^2 при $h_3 = 300 \text{ мм}$; 208 кВт/м^2 при $h_3 = 425 \text{ мм}$ (см. рис. 3а). На высоте стен 2,5 м плотность потоков тепловых излучений дуг снижается со 175 кВт/м^2 при $h_3 = 70 \text{ мм}$ до следующих значений: 153 кВт/м^2 при $h_3 = 160 \text{ мм}$; 98 кВт/м^2 при $h_3 = 300 \text{ мм}$; 56 кВт/м^2 при $h_3 = 425 \text{ мм}$. Таким образом, при полном заглублении дуг в ванну и шлак плотность потоков их тепловых излучений снижается приблизительно в 3 раза по всей высоте стен по сравнению с незначительным заглублением дуг или отсутствием их заглубления.

Прозрачная атмосфера с коэффициентом поглощения, близким к нулю, и вышеперечисленные тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен могут существовать в печи ДСП-100 кратковременно при отключенных инжекторах для вдувания углеродосодержащего порошка и при отсутствии продувки ванны металла кислородом. Подавляющую часть времени после расплавления основной массы шихты в печи работают инжектор для вспенивания шлака, рафинировочные кислородные горелки для продувки ванны металла кислородом, а также поддерживается лучепоглощающая атмосфера. В поглощающей атмосфере максимальные тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен составляют следующие значения (см. рис. 3б) на высоте 0,5 м: 165 кВт/м^2 при $h_3 = 70 \text{ мм}$; 137 кВт/м^2 при $h_3 = 160 \text{ мм}$; 86 кВт/м^2 при $h_3 = 300 \text{ мм}$; 51 кВт/м^2 при $h_3 = 425 \text{ мм}$.

Тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели в поглощающей атмосфере печи (см. рис. 3б) снижаются по высоте стен и составляют следующие значения на высоте 2,5 м: 25 кВт/м^2 при $h_3 = 70 \text{ мм}$; 17 кВт/м^2 при $h_3 = 160 \text{ мм}$; 11 кВт/м^2 при $h_3 = 300 \text{ мм}$; 6 кВт/м^2 при $h_3 = 425 \text{ мм}$. Из сравнения графиков 1–4 на рис. 3а и 3б следует, что максимальные тепловые нагрузки, находящиеся на высоте стен 0,5 м, снижаются в поглощающей атмосфере печи в 4–4,3 раза по сравнению с прозрачной атмосферой. Аналогичные данные получены при экспериментальном исследовании тепловых нагрузок на водоохлаждаемые свод и стены [11–16] дуговой сталеплавильной печи ДСП-100. В случае лучепрозрачной среды тепловые нагрузки на свод ДСП-100 составляют $350\text{--}534 \text{ кВт/м}^2$, при максимальной запыленности тепловые потоки снижаются в 4–4,5 раза до $80\text{--}115 \text{ кВт/м}^2$ [14]. Таким образом, расчетные и экспериментальные данные по изменению в 4–4,5 раза тепловых нагрузок на водоохлаждаемые панели стен и свода при переходе от лучепрозрачной к запыленной атмосфере печи совпадают [1]. Плотности потоков тепловых излучений расположены на своде довольно неравномерно: увеличиваются со $100\text{--}180 \text{ кВт/м}^2$ на периферии (у стен) до $400\text{--}550 \text{ кВт/м}^2$ у электродных отверстий в лучепрозрачной среде и

с 25–45 кВт/м² на периферии до 100–140 кВт/м² у электродных отверстий в поглощающей среде вследствие значительного теплового излучения трех электродов на свод печи [14].

При полном погружении в шлак дуги, а именно в расчетную точку 0, на поверхности стен практически не излучают [10]. Результаты выполненных расчетов, а также расчетов статьи [11] подтверждают, что с ростом заглубления дуг в шлак происходит перераспределение теплового излучения дуг с поверхностей стен, свода на поверхности ванны и шарового сегмента, образуемого в ванне электродинамическими силами дуг [11]. При полном погружении дуг в шлак их тепловое излучение на стены и свод невелико, не превышает 20 % суммарного теплового излучения дуг, большая часть его попадает на поверхности шаровых сегментов, увеличивая КПД дуг до 80 % [10]. Тепловые потоки излучения дуг, падающие на поверхности шаровых сегментов в жидком металле и шлаке, преобразуются в шаровых сегментах в потоки конвективные и теплопроводности. Из шаровых сегментов в ванну металла и шлак тепло передается за счет интенсивной конвекции и теплопроводности соседним слоям жидкого металла и шлака, в том числе слоям, расположенным на откосах печи. Под действием электродинамических сил дуг жидкий металл и шлак перемещаются из шаровых сегментов, выбрасываются из сегментов далеко, иногда до откосов стен напротив дуг. Под действием архимедовой гидростатической подъемной силы новые слои жидкого металла и шлака занимают место в шаровых сегментах, и процесс их перемещения, перемешивания дугами повторяется. Под действием электродинамической и гидростатической подъемной сил процесс конвективного теплообмена в ванне интенсифицируется, что приводит к ускорению расплавления шихты на откосах и выравниванию температуры металла по объему ванны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При работе высокоомощной дуговой сталеплавильной печи ДСП-100 на коротких дугах длиной 250 мм имеется значительная неравномерность распределения плотностей потоков тепловых излучений дуг по ванне: тепловые потоки на участке ванны, расположенные напротив дуг, в 6–74 раза превышают тепловые потоки на участки ванны, расположенные между дугами. Такое распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по ванне ускоряет расплавление шихты на откосах напротив дуг и замедляет расплавление шихты, находящейся на откосах между дугами.

На основе выполненных расчетов распределения плотностей потоков тепловых излучений дуг по поверхности стен печи ДСП-100 установлено следующее. С ростом заглубления дуг длиной 425 мм плотность их максимальных тепловых потоков на стенах в лучепрозрачной атмосфере уменьшается с 650 кВт/м² (при незначительном заглублении дуг) до 262 кВт/м² (при полном заглублении в шлак). В поглощающей атмосфере печи [17–19] плотности тепловых потоков дуг на стенах снижаются со 165 кВт/м² (при незначительном заглублении дуг) до 63 кВт/м² (при полностью заглубленных в шлак дугах). Максимальные тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен от незаглубленных дуг изменяются от 650 кВт/м² в лучепрозрачной атмосфере до 165 кВт/м² в лучепоглощающей атмосфере, т.е. в 4 раза. Расчетные и экспериментальные данные по плотностям тепловых потоков излучений дуг на водоохлаждаемые панели стен печи ДСП-100 совпадают. Максимальные тепловые нагрузки от излучений незаглубленных дуг на водоохлаждаемые панели в лучепрозрачной атмосфере могут стать причиной термических

повреждений панелей, поэтому работа на таких дугах в лучепрозрачной атмосфере печи не только энергозатратна, но и ведет к сокращению срока службы панелей [16, 17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
2. Огороков Н.В. Дуговые сталеплавильные печи. М.: Металлургия, 1971. 347 с.
3. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1985. 280 с.
4. Макаров А.Н., Соколов А.Ю. Электрические, геометрические, тепловые параметры дуг, горящих в парах металлов // *Электрометаллургия*. 2009. № 11. С. 19–24.
5. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
6. Макаров А.Н., Кузнецов А.В., Рыбакова В.В., Галичева М.К. О влиянии формы электрода и параметров дуги на ее заглубливание в ванну металла в дуговых сталеплавильных печах // *Промышленная энергетика*. 2014. № 10. С. 10–15.
7. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 325 с.
8. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Ашпин Н.А. Прямое получение стали из рудного сырья. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 428 с.
9. Макаров А.Н. Изменение КПД дуг в процессе плавки в дуговых сталеплавильных печах // *Металлург*. 2017. № 4. С. 55–58.
10. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок. М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 452 с.
11. Макаров А.Н. Теплообмен в высокомошных дуговых сталеплавильных печах. Часть I. Расчет потоков теплового излучения дуг на ванну и теплообмен в ванне металла // *Металлург*. 2022. № 7. С. 28–34.
12. Макаров А.Н. Теплообмен в высокомошных дуговых сталеплавильных печах. Часть II. Распределение потоков теплового излучения дуг по ванне и стенам // *Металлург*. 2022. № 9. С. 50–54.
13. Макаров А.Н. Теплообмен в высокомошных дуговых сталеплавильных печах. Часть III. Взаимосвязь теплообмена, высоты слоя шлака, КПД дуг и удельного расхода электроэнергии // *Металлург*. 2022. № 11. С. 41–46.
14. Сосонкин О.М., Кудрин В.А. Водоохлаждаемый свод электродуговой печи. М.: Металлургия, 1985. 144 с.
15. Самохвалов Г.В., Черныш Г.И. Электрические печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1984. 232 с.
16. Водоохлаждаемые узлы сверхмошных дуговых сталеплавильных печей / М.Г. Кузьмин [и др.] // *Электрометаллургия*. 2014. № 7. С. 8–16.
17. Хумер О. Водоохлаждаемые панели современных сверхмошных дуговых печей // *МРТ Металлургические заводы и технологии*. 1997. № 8. С. 6–14.
18. Нефедов А.В., Нефедова Е.В. Импортозамещающая технология выгрузки пыли из бункеров электросталеплавильного цеха ОАО «Уральская сталь» // *Сталь*. 2015. № 12. С. 74–76.

19. Электросталеплавильная пыль как дисперсная система / Л.М. Симонян [и др.] // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2010. № 11. С. 68–75.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tgту_kafedra_ese@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Макаров А.Н. Расчет потоков теплового излучения дуг по поверхности ванны и стен высокоомощных электродуговых сталеплавильных печей. Часть II. Распределение тепловых потоков излучения дуг по поверхности стен // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 43–51.

CALCULATION OF THERMAL RADIATION FLUXES OF ARCS ON THE SURFACE OF THE BATH AND WALLS OF HIGH-POWER ELECTRIC ARC STEEL-MELTING FURNACES. PART II. DISTRIBUTION OF HEAT FLUXES OF ARC RADIATION ALONG WALL SURFACES

A.N. Makarov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article calculates the distribution of heat fluxes of radiation of short arcs on the metal bath. It is indicated that when working on short arcs thermal radiation of arcs does not reach the slopes and melting of charge on them is carried out by heat conduction and convection from ball segments under the arcs in the bath; with the growth of arcs buried in the slag heat fluxes of radiation of arcs on the walls are reduced by 3-4 times. It is noted that calculated and experimental data on heat fluxes of arc radiation on water-cooled wall panels coincide.

Keywords: steel, furnace, electric arc, metal bath, heat exchange, thermal radiation, thermal conductivity, convection.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Makarov A.N. Calculation of thermal radiation fluxes of arcs on the surface of the bath and walls of high-power electric arc steel-melting furnaces. Part II. Distribution of heat fluxes of arc radiation along wall surfaces // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2024. No. 3 (23), pp. 43–51.

УДК 623.459.66

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЕРЧАТКИ КАК СРЕДСТВО ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ: СТАТИСТИКА ДЕФЕКТОВ И ПРОЦЕДУРЫ ПРОВЕРКИ

*В.В. Окунева, С.Н. Зубков**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Окунева В.В., Зубков С.Н., 2024

Аннотация. Статья посвящена вопросам, связанным со средствами индивидуальной защиты (СИЗ), диэлектрическими перчатками, их классификацией, методам испытаний. Произведено сравнение различных типов диэлектрических перчаток. Даны рекомендации по выбору типа диэлектрических перчаток для снижения уровня профессиональных рисков на производстве.

Ключевые слова: СИЗ, диэлектрические перчатки, испытания СИЗ, охрана труда и техника безопасности.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-52-62

ВВЕДЕНИЕ

Работы в электроустановках относятся к категории высокоопасных для жизни и здоровья людей. Однако при правильном использовании средств индивидуальной защиты (СИЗ) можно существенно снизить уровень профессиональных рисков. Одним из ключевых средств защиты сотрудников, выполняющих работы на электроустановках, от удара электрическим током являются диэлектрические перчатки. Они изготовлены из материалов, не проводящих ток, обеспечивают необходимый барьер, препятствующий прохождению электрического тока через тело человека. В настоящей статье представлен всесторонний анализ эксплуатационных характеристик диэлектрических перчаток, включая срок их службы, выявляемые дефекты и процедуры их обнаружения. Кроме того, рассмотрены статистические данные, отражающие процентное распределение различных типов дефектов среди всех выявленных.

Основные термины и определения

Основные термины и определения, используемые в статье, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные термины и определения

Термин	Определение
Средство индивидуальной защиты	Средство защиты, используемое одним человеком
Электрозащитное средство	Средство защиты от поражения электрическим током, предназначенное для обеспечения электробезопасности

Окончание табл. 1

Термин	Определение
Основное изолирующее электрозащитное средство	Изолирующее электрозащитное средство, которое позволяет работать на токоведущих частях, находящихся под напряжением, и изоляция которого длительно выдерживает рабочее напряжение электроустановки
Дополнительное изолирующее электрозащитное средство	Изолирующее электрозащитное средство, которое само по себе не может при данном напряжении обеспечить защиту от поражения электрическим током, но дополняет основное средство защиты, а также служит для защиты от напряжения прикосновения и напряжения шага
Работа без снятия напряжения	Работа, выполняемая с прикосновением к токоведущим частям, находящимся под напряжением (рабочим или наведенным), или на расстоянии от этих токоведущих частей менее допустимого

Работы в электроустановках требуют особой осторожности и соблюдения строгих правил безопасности, так как они связаны с высоким риском поражения электрическим током. Одним из основных СИЗ, используемых для минимизации этих рисков, являются диэлектрические перчатки. Они требуются для предохранения рук от воздействия тока, обеспечивают надежную изоляцию и предотвращают прямой контакт с токопроводящими частями.

Диэлектрические перчатки находят широкое применение в различных сферах: от обслуживания бытовых электроустановок до работы с высоковольтными линиями электропередач и промышленными электроустановками. Их использование необходимо при проведении электромонтажных, ремонтных и профилактических работ, где имеется опасность поражения электрическим током. В зависимости от специфики выполняемых задач и уровня напряжения электроустановок применяются различные виды диэлектрических перчаток, отличающиеся материалом изготовления, конструкцией, классом защиты и дополнительными свойствами.

Исследования показывают, что правильный выбор диэлектрических перчаток значительно снижает риск травматизма и повышает уровень безопасности на рабочих местах в электроэнергетической отрасли [1–8]. В связи с этим важно иметь четкое представление о классификации диэлектрических перчаток и их характеристиках.

Цель настоящей статьи – дать подробный обзор видов и классификации диэлектрических перчаток, что позволит специалистам в области электротехники и электробезопасности более эффективно подбирать СИЗ для выполнения конкретных типов работ.

ВИДЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЧАТОК

Диэлектрические перчатки находят применение в электроустановках с напряжением до 1 000 В в качестве основного изолирующего электрозащитного средства, а также в электроустановках с напряжением выше 1 000 В как дополнительное изолирующее электрозащитное средство [9–11].

Классификация диэлектрических перчаток по маркировке

В электроустановках разрешено применять только диэлектрические перчатки, маркированные в соответствии с их защитными свойствами:

Эв – для работ с напряжением более 1 000 В (дополнительное защитное средство);

Эн – для работ с напряжением до 1 000 В (основное защитное средство).

Классификация по материалу изготовления

Диэлектрические перчатки различаются по материалу изготовления:

латексные перчатки – обычно бесшовные, изготовленные из латекса;

перчатки из специальной листовой диэлектрической резины – могут быть шовными (или штанцованными).

Классификация по внешнему виду

В зависимости от внешнего вида диэлектрические перчатки подразделяются:

на *двупалые* – перчатки с отделением для большого пальца и общим отделением для остальных пальцев;

пятипалые – перчатки стандартного расположения отделений под каждый палец.

Классификация по технологии изготовления

Диэлектрические перчатки также классифицируются по технологии изготовления:

шовные (штанцованные) – в основном изготавливаются из специальной листовой резины;

бесшовные (латексные) – изготовлены из латекса, что обеспечивает их высокую эластичность и плотное прилегание.

Классификация по классу защиты

Классификация диэлектрических перчаток по классу защиты основана на максимальном рабочем напряжении:

класс 00 – перчатки с минимальными защитными характеристиками, применяемые для работы на электроустановках малой мощности;

класс 0 – наиболее распространенные диэлектрические перчатки, используемые при работе на электроустановках до 1 000 В;

класс 1 – для работы с оборудованием до 7 500 В;

класс 2 – до 17 000 В;

класс 3 – до 26 500 В;

класс 4 – до 36 000 В.

Классификация по толщине материала

Диэлектрические перчатки классифицируются и по толщине материала:

тонкие – толщина не менее 4 мм;

обычные и жесткие – толщина от 9 мм.

Специальные свойства и маркировка

В различных электроустановках могут потребоваться диэлектрические перчатки со специальными свойствами, что обозначается соответствующей маркировкой:

A – устойчивость к кислоте;

H – устойчивость к нефти;

Z – устойчивость к озону;

R – совмещение свойств устойчивости к кислоте, нефти и озону;

C – устойчивость к сверхнизким температурам;

F – удлиненная манжета.

Длина диэлектрических перчаток в любом случае должна быть не менее 350 мм, что обеспечивает дополнительную защиту предплечья от возможного контакта с токопроводящими частями.

ПРАВИЛА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЧАТОК

Перед использованием диэлектрических перчаток необходимо провести обязательную проверку в соответствии с п. 1.4.5 СО 153-34.03.603-2003 [11]. Данная проверка касается наличия необходимых маркировок, нанесенных на перчатки несмываемой краской, а также целостности перчаток. На них не должно быть видимых повреждений материала, таких как порезы, надрывы или деформации. При отсутствии маркировки об испытании или при обнаружении нарушений целостности материала перчатки должны быть изъяты из эксплуатации.

Помимо видимых повреждений, диэлектрические перчатки могут иметь повреждения, невидимые человеческому глазу. Чтобы их обнаружить, перчатки перед началом работ обязательно проверяются путем скручивания (рис. 1). Запрещается надуть перчатки ртом, так как влага может попасть внутрь перчаток, что недопустимо.



Рис. 1. Проверка диэлектрических перчаток скручиванием

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Согласно приложению № 7 СО 153-34.03.603-2003 [11], диэлектрические перчатки должны испытываться один раз в шесть месяцев путем подачи на них повышенного напряжения 6 кВ в течение одной минуты. Перчатки погружаются в ванну с водой при температуре 25 ± 15 °С. Вода наливается также внутрь перчаток. Уровень воды как

снаружи, так и внутри перчаток должен быть на 45–55 мм ниже их верхних краев, которые должны оставаться сухими.

Принципиальная схема установки для испытания диэлектрических перчаток представлена на рис. 2. Напряжение через трансформатор подается на ванну и через контакты на внутреннюю сторону перчаток. Возможно одновременное испытание нескольких перчаток, однако при этом должна быть обеспечена возможность контроля значения тока, протекающего через каждую испытываемую перчатку. В ходе испытания обязательно контролируется величина тока утечки, которая не должна превышать 6 мА. В случае пробоя задействуются газоразрядная лампа и разрядник для защиты установки от токов короткого замыкания. После окончания испытания перчатки обязательно просушиваются.

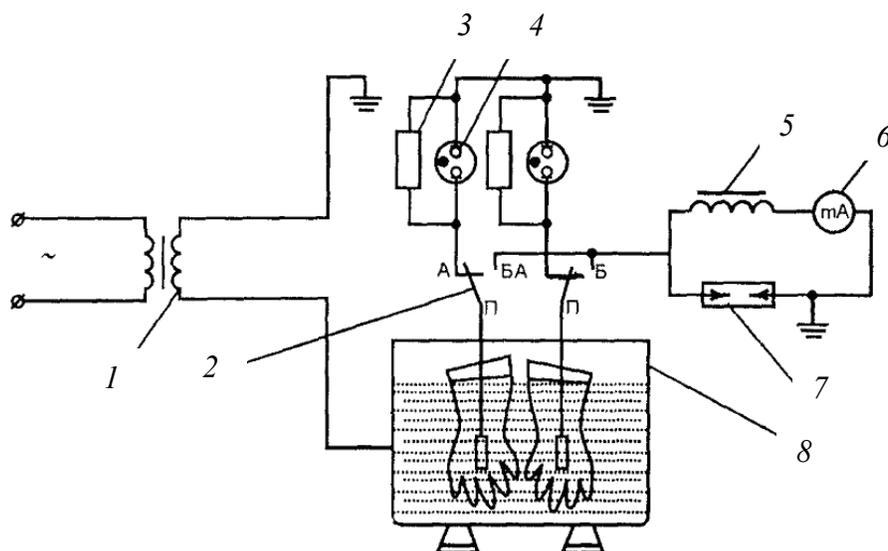


Рис. 2. Принципиальная схема для испытания диэлектрических перчаток:

- 1 – испытательный трансформатор; 2 – контакты переключающие;
3 – шунтирующее сопротивление (15–20 кОм); 4 – газоразрядная лампа; 5 – дроссель;
6 – миллиамперметр; 7 – разрядник; 8 – ванна с водой

По результатам испытания оформляется протокол согласно приложению № 2 СО 153-34.03.603-2003. На перчатки, не прошедшие испытание, наносится штамп, перечеркнутый красной линией [11].

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Испытания проводят на образцах, кондиционированных в соответствии с ГОСТ ISO 23529. В ходе испытаний на определение упруго-прочностных характеристик перчаток с подкладкой используют образцы, изготовленные из перчаток без подкладки.

Условную прочность при растяжении, относительное удлинение при разрыве, относительное остаточное удлинение при разрыве определяют по ГОСТ 12580, используя образец для испытания. Из каждой испытываемой перчатки вырезают четыре образца в виде двусторонней лопаточки (рис. 3): один из ладонной части, один с тыльной стороны и два из области запястья.

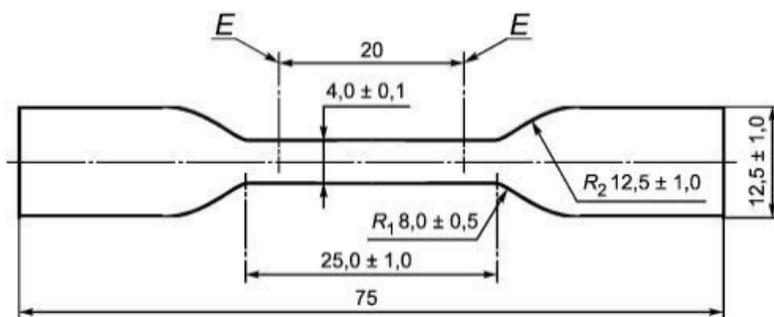


Рис. 3. Образец для испытаний на физико-механические показатели

Рабочий участок длиной 20 мм отмечают на узкой части образца с помощью параллельных меток (см. рис. 3). Испытание считают положительным, если результаты соответствуют табличным требованиям (табл. 2).

Таблица 2

Физико-механические показатели диэлектрических перчаток

Наименование показателя	Норма
Условная прочность, МПа, не менее	16
Относительное удлинение, %, не менее	600
Стойкость к проколу, Н/мм, не менее*	18
Остаточная деформация при растяжении, %, не более	15

Примечание. * – для композитных диэлектрических перчаток стойкость к проколу должна быть не менее 60 Н.

УСЛОВИЯ ХРАНЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЧАТОК

Диэлектрические перчатки должны храниться в сухом и чистом виде в специально отведенном темном месте при температуре от 0 до 30 °С и относительной влажности воздуха до 65 %, на расстоянии не менее 1 м от источников тепла. При хранении перчатки не должны подвергаться воздействию солнечных лучей, воды, масел, щелочей и других веществ, разрушающих резину и латекс [1, 2, 7–9, 11]. В процессе эксплуатации рекомендуется промывать перчатки мыльной водой и просушивать их. Запрещается использовать влажные диэлектрические перчатки.

**СРАВНЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЧАТОК,
ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ РАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ
(ЛИСТОВАЯ РЕЗИНА И ЛАТЕКС)**

На современном рынке представлено множество производителей СИЗ, предлагающих различные виды диэлектрических перчаток. В настоящей статье проведено сравнение двух наиболее распространенных типов перчаток с классом защиты 0 – латексных и шовных (штанцованных).

Стандартный гарантийный срок хранения для диэлектрических перчаток составляет 12 месяцев, однако при аккуратном использовании и регулярных испытаниях (один раз в шесть месяцев) срок службы может быть продлен [1, 2, 6, 9, 11].

РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Для оценки и сравнения износостойкости диэлектрических перчаток с классом защиты 0 (латексных и шовных (штанцованных)), произведенных с применением двух разных технологий изготовления, велось исследование 2 раза в год в течение 8 лет. Проводилась проверка разных диэлектрических перчаток. В случае непрохождения испытаний они отбраковывались и дальше проверке не подвергались. Так, результаты проверки по годам латексных перчаток приведены на рис. 4, а шовных (штанцованных) – на рис. 5.

Наименование перчаток	Год проверки/статус																		Примечания
	2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022		2023		2024		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Перчатки АЗРИ, класс 0, производство IV 2008 г.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	
Перчатки АЗРИ, класс 0, производство IV 2008 г.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	
Перчатки АЗРИ, класс 0, производство IV 2008 г.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	
Перчатки АЗРИ, класс 0, производство IV 2008 г.	1	1	1	1	1	1	1	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Правая перчатка – механическое повреждение латекса в зоне большого пальца
Перчатки АЗРИ, класс 0, производство 01.2017 г.	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	
Перчатки АЗРИ, класс 0, производство 01.2017 г.	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	
Перчатки АЗРИ, класс 0, производство 04.2021 г.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	-	
Перчатки «Мерион Спецдежда», класс 0, производство 02.2018 г.	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	-	-	Правая перчатка – расслоение латекса. Перчатки были оставлены в летний период под прямыми лучами солнца, видимое расслоение латекса в районе запястья
Перчатки «Мерион Спецдежда», класс 0, производство 02.2020 г.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	-	
Перчатки «Мерион Спецдежда», класс 0, производство 09.2021 г.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	-	

Рис. 4. Результаты проверки латексных диэлектрических перчаток по годам, отражающие статус проверки (1/0, где 1 – испытания пройдены; 0 – испытания не пройдены)

Статистический анализ данных, полученных в ходе исследования в испытательной лаборатории, показал, что при прочих равных условиях хранения латексные диэлектрические перчатки демонстрируют более высокую надежность и долговечность. Латексные перчатки также имеют более широкую номенклатуру по специальным свойствам, что делает их выбор для предприятий экономически оправданным.

Анализ сроков службы и дефектов диэлектрических перчаток выявил следующие результаты: все исследуемые штампованные перчатки не прошли испытания и находились в эксплуатации до 4 лет. В то же время в группе латексных перчаток около 80 % успешно проходили испытания и продолжают использоваться. Основным дефектом латексных перчаток являлось расслоение латекса, которое наблюдалось в 100 % случаев повреждений. Для шовных перчаток в 40 % случаев причиной непрохождения испытаний было расхождение шва, в то время как в оставшихся 60 % наблюдалось расслоение резинового пласта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования был выполнен сравнительный анализ диэлектрических перчаток, изготовленных из латекса и листовой резины. В результате статистического анализа установили, что латексные перчатки обладают более высокой износостойкостью и надежностью, что подтверждается их способностью выдерживать большее количество циклов испытаний без видимых повреждений. При этом шовные (штанцованные) перчатки показали менее устойчивые результаты. Часто они не проходили испытания из-за повреждений материала или расхождения швов.

Результаты исследования говорят об экономической и практической целесообразности использования латексных диэлектрических перчаток в условиях эксплуатации электрических установок. Латексные перчатки демонстрируют более долгий срок службы и обладают более широким спектром специальных свойств, что делает их предпочтительным выбором при решении различных задач в электроэнергетике.

Перспективы развития

Для дальнейшего развития темы исследования и повышения безопасности использования диэлектрических перчаток предлагаются следующие направления:

1. Разработка новых материалов. Исследование и создание новых, более долговечных и устойчивых материалов для изготовления диэлектрических перчаток, которые обеспечат еще более высокий уровень защиты и долговечности.

2. Усовершенствование технологий производства. Внедрение новых технологий и методов производства, таких как использование нанотехнологий и композитных материалов, может значительно повысить качество и надежность диэлектрических перчаток.

3. Автоматизация и улучшение методов тестирования. Разработка автоматизированных систем для более точного и быстрого проведения испытаний диэлектрических перчаток, включая методы неразрушающего контроля, позволит оперативно выявлять дефекты и улучшать процесс контроля качества.

4. Повышение информированности и уровня обучения персонала. Необходима разработка программ обучения для повышения уровня осведомленности работников о правильном использовании и уходе за диэлектрическими перчатками, а также регулярное проведение тренингов по технике безопасности.

5. Исследование долговечности в реальных условиях эксплуатации. Проведение долгосрочных исследований по изучению долговечности и эффективности диэлектрических перчаток в реальных условиях эксплуатации позволит получить более точные данные и рекомендации по их использованию.

Продолжение исследований по указанным направлениям даст возможность повысить уровень безопасности работников, снизить риски травматизма и улучшить общую эффективность использования СИЗ в электроэнергетической отрасли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Конспект лекций по курсу «Основы охраны труда». Тема: «Электробезопасность» / сост. В.С. Бутев. Донецк: ДонНТУ, 2012. 30 с.
2. Данилова С.С., Николаева В.М. Основные электротехнические средства и их эксплуатация // Аллея науки. 2018. № 11 (4). С. 318–321.
3. Никольский О.К., Еремина Т.В., Семичевский П.И. Методика анализа безопасности в электроустановках до 1 000 В // *Электробезопасность*. 2012. № 4. С. 3–14.
4. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Технология электромонтажных работ: учебное пособие. 4-е изд., испр. и доп. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2023. 352 с.
5. Bird Sr.V. Electrical Safety: Protecting Employees & Facilities // *Professional Safety*. 2002. No. 4 (47). P. 64.
6. Jooma Z. Electrical Workplace Safety-Seven Electrical Safety Habits // *Electrical Arc Flash Conference*. 2013. P. 1–14.
7. Kolcio N., Peszlen R.A. Electrical Aspects of Testing Insulating Gloves // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. 1983. No. 7. P. 2364–2368.
8. Tompkins P. High-voltage Electric Safety: Safety Precautions for Working on or Near High-voltage Power Lines ASSE // *Engineering, Environmental Science*. 2004. P. ASSE-04.
9. ГОСТ 12.4.307-2016. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Перчатки диэлектрические из полимерных материалов. Общие технические требования и методы испытаний (с поправками). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200143235> (дата обращения: 30.05.2024).
10. ТР ТС 019/2011. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности средств индивидуальной защиты» от 09 декабря 2011. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320567> (дата обращения: 30.05.2024).
11. СО 153-34.03.603-2003. Инструкция по применению и испытанию средств защиты, используемых в электроустановках. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/41/41349/index.htm> (дата обращения: 30.05.2024).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ОКУНЕВА Виктория Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: Bukashka_89@inbox.ru

ЗУБКОВ Сергей Николаевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: sergei2076@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Окунева В.В., Зубков С.Н. Диэлектрические перчатки как средство индивидуальной защиты: статистика дефектов и процедуры проверки // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 3 (23). С. 52–62.

**DIELECTRIC GLOVES AS A MEANS OF PERSONAL PROTECTION:
DEFECT STATISTICS AND VERIFICATION PROCEDURES**

V.V. Okuneva, S.N. Zubkov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The article is devoted to the issues related to personal protective equipment (PPE), dielectric gloves, their classification, testing methods. Different types of dielectric gloves are compared. Recommendations on the choice of the type of dielectric gloves to reduce the level of occupational risks at work are given.

Keywords: PPE, dielectric gloves, PPE tests, occupational health and safety.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

OKUNEVA Victoria Valeryevna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Bukashka_89@inbox.ru

ZUBKOV Sergey Nikolaevich – Master’s Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: sergei2076@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Okuneva V.V., Zubkov S.N. Dielectric gloves as a means of personal protection: defect statistics and verification procedures // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 3 (23), pp. 52–62.

УДК 537.811; 531.311

**ПРИОРИТЕТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ НАД МЕХАНИКОЙ
НА ПРИМЕРЕ ВТОРОГО ЗАКОНА НЬЮТОНА**

И.П. Попов
Курганский государственный университет (г. Курган)

© Попов И.П., 2024

Аннотация. В статье отмечено, что приоритет электродинамики над механикой можно обосновать тем, что главная аксиома динамики – второй закон Ньютона – выводится из соотношений электромагнетизма. Показано, что формула второго закона

Ньютона получается при использовании метода прямого и обратного формальных преобразований механических и электромагнитных величин. Это дает возможность изменить статус второго закона Ньютона с постулата на соотношение, полученное в результате абстрактного математического моделирования. Указано, что в качестве практического аспекта полученных результатов можно рассматривать искусственную электромагнитную массу, которая неотличима от «натуральной» в части соответствия второму закону Ньютона; искусственная электромагнитная масса может использоваться в следящих приводах систем автоматического управления для обеспечения балансировки движущихся инертных узлов и агрегатов, масса которых может изменяться в процессе работы, а регулирование возможно электрическим путем за счет изменения емкости или напряженности магнитного поля.

Ключевые слова: второй закон Ньютона, постулат, масса, сила, оригинал, образ.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-62-69

ВВЕДЕНИЕ

Второй закон Ньютона является основной аксиомой динамики [1–4] и представляет собой постулат, базирующийся на экспериментальных данных.

Задача настоящей статьи заключается в том, чтобы вывести формулу второго закона Ньютона, не опираясь при этом на результаты соответствующих опытов. Таким образом, актуальность работы обусловлена снижением степени феноменологичности начал механики.

За решение указанной задачи иногда принимают вывод формулы второго закона Ньютона с использованием функции Лагранжа и принципа наименьшего действия Гамильтона. Однако в функцию Лагранжа входит кинетическая энергия, формула которой вытекает из второго закона Ньютона. Соответственно, при таком подходе второй закон Ньютона выводится из самого себя, что может расцениваться как тавтология.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Задачу возможно решить широко распространенным методом, основанным на преобразовании оригинала G в образ $g (g = A(G))$, совершении над образом необходимых действий и обратном преобразовании результата $l = f(g)$ из пространства образов в пространство оригиналов ($L = A^{-1}(l)$).

Данный метод, в частности, лежит в основе операционного исчисления, широко распространенного в теории автоматического управления и электротехнике. В качестве прямого и обратного преобразований там используются преобразования Лапласа или Карсона.

Аналогичный подход применяется в ходе вычислений громоздких произведений, где в качестве прямого преобразования используется логарифмирование, а в качестве обратного – потенцирование.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Решение на микроуровне. В качестве отправного пункта могут выступать соотношения, выражающие массу электрона через электромагнитные величины [5]:

$$m_e = k \frac{e^2 \mu_0}{b}, \quad (1)$$

где e – электрический заряд электрона; μ_0 – магнитная постоянная; b – величина, имеющая размерность длины; k – безразмерный коэффициент, конкретное значение которого не имеет принципиальной важности для целей настоящей работы.

Пусть электрически нейтральная частица массой m_e движется в направлении \mathbf{r} со скоростью $\mathbf{v} = v \frac{\mathbf{r}}{r}$.

Выражение (1), строго говоря, не предполагает какой-то конкретной геометрической формы электрона, при этом оно позволяет временно формально представить рассматриваемую частицу в виде эквивалентной безмассовой заряженной сферы радиуса $k_1 b$. Это представление соответствует прямому преобразованию ($g = A(G)$). Здесь k_1 – коэффициент пропорциональности, который при дальнейшем согласовании прямого и обратного преобразований определяется однозначно.

Энергия электростатического поля равномерно заряженной сферы радиуса $k_1 b$ и зарядом e определяется выражением

$$W_\varepsilon = \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 k_1 b}, \quad (2)$$

где ε_0 – электрическая постоянная [6]. В качестве среды можно рассматривать вакуум, относительная диэлектрическая проницаемость которого равна единице.

Поскольку заряженная сфера поступательно движется, имеет место магнитное поле, напряженность которого $\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0 c^2} [\mathbf{v}, \mathbf{E}]$, где c – скорость света, а \mathbf{E} – напряженность электрического поля. Энергии электрического и магнитного полей соотносятся следующим образом:

$$dW_\varepsilon = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} dV = \frac{E^2}{2c^2 \mu_0} dV;$$

$$dW_\mu = \frac{\mu_0 H^2}{2} dV = \frac{\mu_0}{2} \left\{ \frac{1}{\mu_0 c^2} [\mathbf{v}, \mathbf{E}] \right\}^2 dV = k_2 \frac{E^2 v^2}{2\mu_0 c^4} dV = k_2 dW_\varepsilon \frac{v^2}{c^2},$$

где k_2 – коэффициент пропорциональности, обусловленный пространственной конфигурацией магнитного поля. Этот коэффициент меньше единицы, поскольку часть радиальных силовых линий электростатического поля ориентирована вдоль направления движения и по этой причине не вносит вклад в формирование магнитного поля.

С учетом выражения (2)

$$W_\mu = k_2 W_\varepsilon \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{2} \frac{k_2 e^2 v^2}{4\pi\varepsilon_0 k_1 b c^2} = k \frac{e^2 \mu_0 v^2}{2b}.$$

Здесь учитывается, что

$$c^2 = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}.$$

Соответствующим образом подбирая k_1 , можно добиться равенства

$$k = \frac{k_2}{4\pi k_1}.$$

Сила является градиентом энергии:

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \frac{dW_\mu}{d\mathbf{r}} = k \frac{e^2 \mu_0}{2b} \frac{d(v^2)}{d\mathbf{r}} = k \frac{e^2 \mu_0}{b} \mathbf{v} \frac{d\mathbf{v}}{d\mathbf{r}} = k \frac{e^2 \mu_0}{b} \mathbf{v} \frac{d\mathbf{v}/dt}{d\mathbf{r}/dt} = \\ &= k \frac{e^2 \mu_0}{b} \mathbf{v} \frac{1}{\mathbf{v}} \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = k \frac{e^2 \mu_0}{b} \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2}. \end{aligned}$$

На этом временное формальное электромагнитное представление прекращается. С помощью выражения (1) производится обратный переход к механическому рассмотрению движения электрически нейтральной инертной частицы (т.е. обратное преобразование ($L = A^{-1}(l)$)).

$$\mathbf{F} = m_e \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2}.$$

Это формула второго закона Ньютона, полученная без применения экспериментальных данных, основанных на использовании инертных частиц.

Решение на макроуровне. Для установления вида преобразования $g = A(G)$ ($L = A^{-1}(l)$) в этом случае может быть рассмотрен электромеханический трансформер (рисунок).

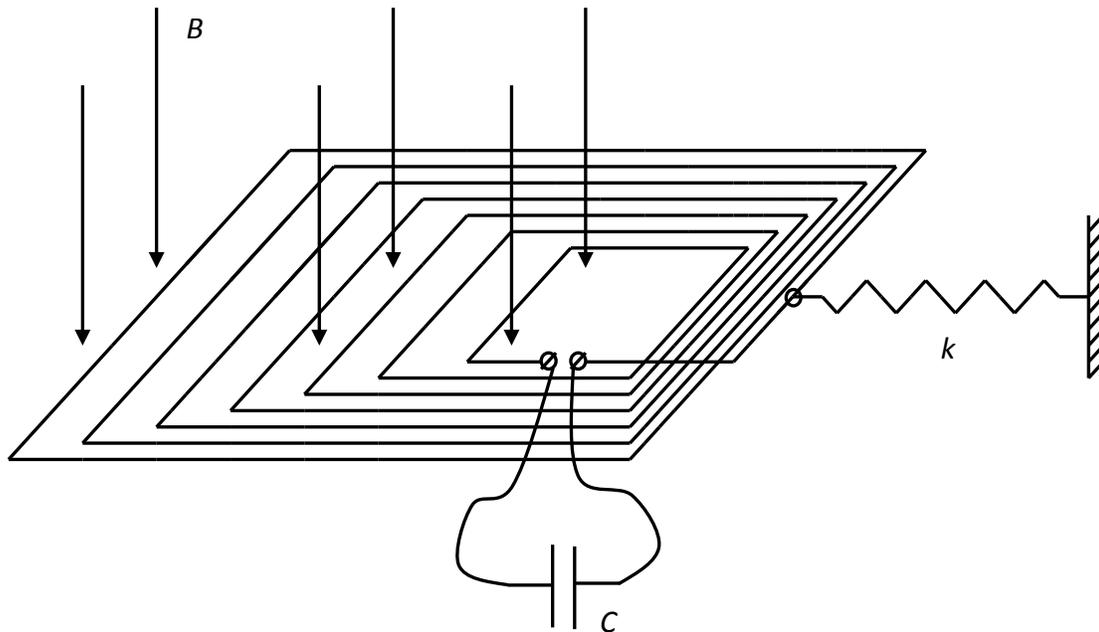


Схема электромеханического трансформера

Электромеханический трансформер имеет следующие параметры (см. рисунок): коэффициент жесткости пружины k , магнитную индукцию B (в магнитном поле находится n проводников с длиной активной части l) [7–10], электрическую емкость конденсатора C . Активное сопротивление, потери на трение, индуктивность, емкость и масса проводников во внимание не принимаются.

Механическое и электрическое состояния трансформера описываются системой двух уравнений в соответствии с законами Гука, Ампера и вторым законом Кирхгофа:

$$\begin{cases} kx = -Blni \\ Bln \frac{dx}{dt} = u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t idt \end{cases}, \quad (3)$$

где x – перемещение якорной обмотки; $Blni$ – сила в соответствии с законом Ампера; $Bln \frac{dx}{dt}$ – электродвижущая сила электромагнитной индукции. Правая часть второго уравнения – это напряжение на конденсаторе; B, l, n – величины, обуславливающие электромеханическое взаимодействие. Для компактности их можно объединить в параметрический коэффициент

$$y = (Bln)^2.$$

При подстановке первого уравнения системы (3) во второе с учетом последнего выражения и последующем дифференцировании по времени получается классическое дифференциальное уравнение свободных гармонических колебаний

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{yC} x = 0.$$

В отличие от традиционных колебательных систем, состоящих из однородных элементов, рассматриваемый трансформер представляет собой осциллятор, включающий элементы разной физической природы – механической и электромагнитной.

Собственная частота колебаний трансформера

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{yC}}.$$

Сопоставление ее с формулой для собственной частоты колебаний механического маятника

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

позволяет сделать вывод, что изображенный на рисунке трансформер, за исключением пружины, представляет собой неотличимый в части взаимодействия с другими объектами аналог инертного тела с эквивалентной массой

$$m = yC. \quad (4)$$

Полученная формула, связывающая массу с электромагнитными величинами, может выступать в качестве отправного пункта решения поставленной задачи.

Пусть инертное тело массой m движется со скоростью v . Выражение (4) позволяет временно формально представить его в виде эквивалентного безмассового трансформера (не беря во внимание пружину). Это представление соответствует прямому преобразованию ($g = A(G)$).

Дифференцирование второго уравнения системы (3) дает возможность получить выражение

$$i = y^{0,5} C \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

С учетом последнего соотношения закон Ампера можно записать в виде

$$F = Blni = yC \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

На этом временное формальное электромагнитное представление прекращается. С помощью выражения (4) производится обратный переход к механическому рассмотрению движения инертного тела (т.е. обратное преобразование ($L = A^{-1}(l)$)). При этом, согласно последней формуле для силы,

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2}.$$

Это формула второго закона Ньютона, полученная без применения экспериментальных данных, основанных на использовании инертных тел.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исторически механика как наука появилась значительно раньше электродинамики, поэтому формально-математический аппарат последней в основном заимствовался у первой. Однако главные законы электродинамики невозможно получить, пользуясь исключительно механическими представлениями. Другими словами, электродинамика из механики не вытекает.

В работе показано обратное, а именно то, что основные механические явления вполне могут быть объяснены с позиций электродинамики. Это можно расценивать как приоритет электродинамики перед механикой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов И.П. Уравнение трогания поезда // *Известия РАН. Механика твердого тела*. 2021. № 2. С. 88–97.
2. Попов И.П. Элементы баллистического расчета при гравитационном маневре космического аппарата // *Космические аппараты и технологии*. 2021. Т. 5. № 2. С. 77–81.

3. Попов И.П. К расчетам параметров пассивных гравитационных маневров межпланетных космических аппаратов // *Труды МАИ*. 2021. № 118. URL: <http://ma.ru/> (дата обращения: 22.07.2024).
4. Попов И.П. Импедансы и адмитансы механических систем // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2020. № 5 (343). С. 3–11.
5. Попов И.П. Сведение постоянной Планка к классическим фундаментальным константам // *Вестник Удмуртского университета. Физика и химия*. 2014. Вып. 3. С. 51–54.
6. Попов И.П. Полный учет энергии электростатического поля заряженных сфер // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 1 (21). С. 45–56.
7. Попов И.П. Электромеханический маховик с искусственным (емкостным) моментом инерции // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2021. № 1 (9). С. 58–63.
8. Попов И.П. Амплитудно-частотные особенности режимов нагрузки синхронной электрической машины // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 49–56.
9. Попов И.П. Искусственный момент инерции // *Труды МАИ*. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165307> (дата обращения: 23.07.2024).
10. Попов И.П. Конденсатор механической энергии // *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России*. 2023. № 4 (160). С. 37–402.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

ПОПОВ Игорь Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов, ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», 640020, Россия, г. Курган, ул. Советская, д. 63/4. E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Попов И.П. Приоритет электродинамики над механикой на примере второго закона Ньютона // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 62–69.

**PRIORITY OF ELECTRODYNAMICS OVER MECHANICS
USING THE EXAMPLE OF NEWTON'S SECOND LAW***I.P. Popov**Kurgan State University (Kurgan)*

Abstract. In the article it is noted that the priority of electrodynamics over mechanics can be justified by the fact that the main axiom of dynamics - Newton's second law - is derived from the relations of electromagnetism. It is shown that the formula of Newton's second law is obtained by using the method of forward and backward formal transformations of mechanical and electromagnetic quantities. This makes it possible to change the status of Newton's second law from a postulate to a relation obtained as a result of abstract mathematical modeling. It is indicated that as a practical aspect of the obtained results it is possible to consider an artificial electromagnetic mass, which is indistinguishable from the “natural” one in terms of compliance with Newton's second law; the artificial electromagnetic mass can be used in tracking drives of automatic control systems to provide balancing of moving inert units and aggregates, the mass of which can change during operation, and regulation is possible electrically by changing the capacitance or magnetic field strength.

Keywords: Newton's second law, postulate, mass, force, original, image.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

POPOV Igor Pavlovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Mechanical Engineering, Machine Tools and Instruments, Kurgan State University, 63/4, Sovetskaja St., Kurgan, 640020, Russia. E-mail: uralakademia@kurganstalmost.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Popov I.P. Priority of electrodynamics over mechanics using the example of Newton's second law // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 3 (23), pp. 62–69.

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ



УДК 532.135: 666.97

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДООБРАЗНЫХ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ, С ПОМОЩЬЮ КОНУСНОЙ ПЕНЕТРАЦИИ. ЧАСТЬ 2. ПРИБОРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В.В. Белов*Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Белов В.В., 2024

Аннотация. В статье отмечено, что главной проблемой при использовании конических пластометров считается получение достоверных реологических характеристик дисперсных систем. Большинство уплотненных трехфазных систем, применяемых в производстве строительных материалов, являются твердообразными, в них периоды восстановления разрушенных связей сокращаются и тиксотропия участвует в процессе течения скрыто, реализуясь лишь при поддержании состояния разрушения внутренних связей. Для таких систем необходимо использовать метод определения реологических характеристик, основанный не на измерении параметров релаксации напряжений, а на картине течения среды вокруг конуса. Указано, что предельное напряжение сдвига и вязкость твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, могут определяться методом погружения конуса на пенетрационном реометре ПРБ-2 с использованием методики, разработанной на основе теории, которая вытекает из экспериментально зафиксированной картины деформирования среды вокруг конуса.

Ключевые слова: структурированные дисперсные системы, предельное напряжение сдвига и вязкость, метод конусной пенетрации, конусный реометр.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-70-78

В части 1 настоящей работы [1] на основе изучения картины течения твердообразной дисперсной среды вокруг погруженного в нее конуса было показано, что для определения реологических характеристик таких систем целесообразно использовать метод конусной пенетрации. В то же время применение рассмотренной методики расчета пластично-вязких характеристик позволяет использовать пластометр как конусный реометр, на котором можно измерять как предельное напряжение сдвига, так и вязкость дисперсных систем.

Как было отмечено в работе [1], способ измерения пластической прочности дисперсных материалов по глубине погружения конуса под действием силы известной величины был предложен П.А. Ребиндером и Н.А. Семеновым в 1949 г. [2]. Пластическая

прочность материала P_m (или предельное напряжение сдвига, если использовать терминологию авторов из указанной работы) устанавливалась по формуле

$$P_m = \frac{P}{S} = \frac{K \cdot P}{h^2}, \quad (1)$$

где P – нагрузка, действующая на конус; $S = \frac{h^2}{K}$ – проекция на горизонтальную плоскость

погрузившейся в материал части поверхности конуса; h – глубина погружения конуса; K – коэффициент, зависящий от угла при вершине конуса.

Коэффициент K рассчитывается либо по формуле П.А. Ребиндера [2], либо по формуле Н.И. Агранат и М.Ф. Широкова [3] с учетом развития пластических деформаций в некотором объеме вокруг конуса.

Как было отмечено ранее, метод конического пластометра обладает такими преимуществами, как широкий диапазон измерений, быстрота и легкость их выполнения, возможность нескольких замеров на одном образце. Главное достоинство состоит в том, что метод позволяет вести измерения в высококонцентрированных твердообразных системах, т.е. в таких условиях, где другие способы не подходят.

Главной проблемой при использовании метода является получение инвариантных результатов измерений по отношению к режиму работы прибора. В ранней работе П.А. Ребиндера и Н.А. Семенов [2], а также С.П. Ничипоренко [4] приводятся данные об инвариантности результатов измерений, а в других работах (Г.Я. Гораздовского и П.А. Ребиндера [5], Б.Я. Ямпольского и П.А. Ребиндера [6], Х.В. Рандма [7]) сообщается об отсутствии инвариантности значений предельного напряжения сдвига, полученных при различной глубине погружения конуса, причем нарушение инвариантности тем больше, чем меньше глубина погружения. В работе В.Ф. Разоренова [8] приводятся взятые из многих источников данные по пенетрации грунтов. Они показывают, что при глубинах погружения конуса 10–15 мм значения удельного сопротивления пенетрации инвариантны, а при глубинах менее 15 мм неинвариантны по отношению к глубине погружения конуса. В работе [9] была также установлена неинвариантность пластической прочности от угла при вершине конуса.

Для исключения влияния инерции неравномерно движущегося конуса на измерения И.И. Берней [10] предложил конструкцию пластометра, в которой конус неподвижен, а его внедрение происходит за счет подъема с постоянной скоростью столика с образцом. Столик автоматически останавливался, как только сила P , действовавшая на конус, уравновешивалась давлением на него со стороны среды. В этот момент измерялась глубина погружения конуса h (высота подъема столика с образцом) и по формуле (1) рассчитывалась пластическая прочность P_m .

Позднее с аналогичной целью были предложены конические пластометры с квазистационарным конусом [11], а также с постоянной скоростью его погружения в исследуемую среду [12]. На этих пластометрах производились измерения усилия в процессе погружения конуса в среду, а также релаксации напряжений на полностью остановленном конусе. Данные пластометры отличались сложностью конструкции и неизбежной погрешностью, возникающей за счет неучитываемого перемещения упругого элемента или датчика Холла.

Основной проблемой при использовании конических пластометров оставалось определение достоверных реологических характеристик дисперсных систем. С этой целью был предложен, в частности, метод релаксационной пенетрометрии с помощью

пластометра с квазистационарным конусом, использованный при подборе составов шпаклевочных растворов и других подобных систем [13, 14]. Однако эти системы являются жидкообразными, для которых метод релаксационной пенетрометрии может быть принципиально применен. В то же время большинство уплотненных трехфазных систем, применяемых в производстве строительных материалов, представляют собой твердообразные тела, для которых периоды восстановления разрушенных связей сокращаются, а тиксотропия, т.е. способность восстанавливать структуру после разрушения внутренних связей, проявляется скрыто, что не позволяет использовать метод релаксационной пенетрометрии.

Как следовало из характера работы пластометра И.И. Бернея, на этом приборе определялось не предельное напряжение сдвига τ_0 , а действующее напряжение сдвига τ , частью которого, кроме τ_0 , являлась динамическая составляющая, зависящая от вязкости и градиента скорости сдвига в деформируемом слое среды. На этих предпосылках основывалась разработка теории и способа определения предельного напряжения сдвига и вязкости дисперсных сред с помощью данного конического пластометра [15–17]. Ее итогом явилось расчетное уравнение для определения предельного напряжения сдвига σ_0 и вязкости η пластично-вязкой среды на конусном пластометре, работающем при постоянной скорости внедрения конуса [1]:

$$K_1 \frac{P}{h^2} = \sigma_0 + \eta K \frac{U_k}{h}, \quad (2)$$

где K и K_1 – постоянные, зависящие от угла при вершине конуса α .

Для эффективного использования данной методики важным вопросом является применение соответствующего приборного обеспечения, которое обеспечивало бы необходимые показатели достоверности и объективности результатов испытаний. Решение данной задачи нашло выражение в виде усовершенствования пластометра И.И. Бернея и разработки на его основе пенетрационного реометра (вискозиметра) ПРБ-2 (рис. 1) [18].

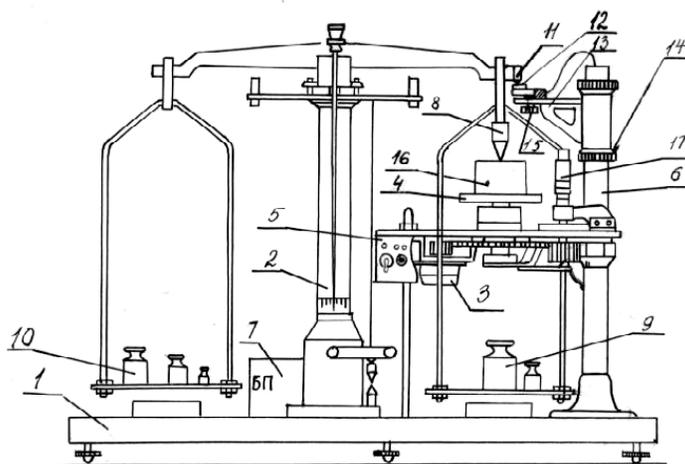


Рис. 1. Схема пенетрационного реометра ПРБ-2

Пенетрационный реометр ПРБ-2 создан на основе равноплечных весов. На подставке 1 прибора укреплены все основные узлы и детали: весы 2, электропривод 3, подвижный столик 4, электронный блок управления 5, опора контактного узла 6, блок

питания 7. На правой части коромысла весов подвешен конус 8, нагружаемый гирями 9. На левой части коромысла весов подвешена чаша с гирями 10, уравнивающими массу конуса. Правая часть коромысла своим точечным контактом 11 опирается на контактную пластину 12, расположенную на кронштейне 13. С помощью контргаяк 14 и винта 15 осуществляется регулировка контактной пластины в вертикальном положении. Исследуемый образец 16 располагается на столике 4, который может подниматься и опускаться с постоянной скоростью при помощи электропривода 3. Величина перемещения столика с образцом измеряется микрометром 17.

Реометр ПРБ-2 работает следующим образом. После включения двигателя происходит подъем столика с образцом, а также погружение конуса в исследуемую среду. После того как усилие, действующее на конус со стороны среды, в которую он погружается при подъеме столика, превысит вес гирь, установленных на правой чаше весов, правая часть коромысла поднимется, разорвутся контакты 11, 12 (см. рис. 1). При этом на обе обмотки двухфазного двигателя будет подаваться однофазное напряжение, так что он остановится за счет электрического тормозного момента без запаздывания.

Для изготовления образцов исследуемого материала применяют полые цилиндрические формы диаметром 80–90 мм и высотой 40–50 мм, устанавливаемые на стальные пластинки. Вначале определяют отсчет, соответствующий положению столика 4 (см. рис. 1), при котором конус 8 соприкасается с поверхностью образца, находящейся в одной плоскости с краями формы. Для этого форму с подставкой устанавливают на столик прибора, поверх формы укладывают стеклянную пластинку известной толщины, правую чашу весов нагружают гирями массой 20–50 г и поднимают столик вверх. После автоматической остановки столика при соприкосновении острия конуса со стеклянной пластинкой снимают отсчет по микрометру. Начальный отсчет для данной формы OM_ϕ можно выразить следующим образом:

$$OM_\phi = OM_n + h_{cm},$$

где OM_n – отсчет по микрометру, соответствующий моменту автоматической остановки столика, мм; h_{cm} – толщина стекла, мм.

Образец для испытаний изготавливается следующим образом. Форму, установленную на подставке, заполняют исследуемым материалом с небольшим избытком в несколько приемов, чтобы не было пустот, раковин и других недоуплотнений в образце. Избыток материала снимают широким металлическим ножом вровень с краями формы. После изготовления образец должен иметь гладкую поверхность, лежащую в одной плоскости с краями формы.

Форму вместе с образцом устанавливают на столик прибора. Включают прибор и опускают столик в исходное положение, чтобы поверхность материала была ниже вершины конуса.

Подбирают вес гирь P_1 на правой чаше весов из условия погружения конуса на глубину h не менее 5–6 мм. Согласно уравнению (2), для определения предельного напряжения сдвига и вязкости достаточно выполнить два измерения глубины погружения конуса в одну и ту же лунку на поверхности образца при двух действующих на конус нагрузках. Однако для повышения точности измерений за счет учета возможных неоднородностей образца выполняют три-четыре измерения глубины погружения h при трех-четырех нагрузках P в одной лунке. Для этого после первого измерения при нагрузке на конус P_1 , не вынимая конуса из лунки, удваивают вес гирь и тем самым устанавливают нагрузку на конус $P_2 = 2P_1$. Вновь включают механизм подъема столика, после чего

погружение конуса продолжается до новой остановки. Снимают соответствующий отсчет по микрометру. Затем вновь увеличивают вес гирь до $P_3 = 3P_1$, включают механизм подъема, снимают отсчет по микрометру, соответствующий нагрузке P_3 . Увеличивая нагрузку до $P_4 = 4P_1$, снимают последний отсчет. Нагрузки P_1, P_2, P_3, P_4 рекомендуется подбирать такими, чтобы значения глубины погружения были в пределах 5–6; 9–10; 13–14; 18–19 мм. При этом соотношения между нагрузками могут отличаться от указанных выше.

Закончив измерения в одной лунке, при тех же нагрузках выполняют погружение конуса в других местах на поверхности образца. Количество параллельных измерений (лунок) находят статистическим расчетом на основе максимально допустимой погрешности определения реологических характеристик. Как правило, на одном образце выполняется не менее трех параллельных измерений. Расстояние между краями соседних лунок должно быть не менее 30 мм, а между краями лунок и стенкой формы – не менее 15 мм.

Глубину погружения конуса определяют по формуле $h = OM - OM_\phi$, где OM – отсчет по микрометру при погружении конуса, мм; OM_ϕ – начальный отсчет для данной формы, мм.

Для каждой нагрузки P (Н) и глубины погружения конуса h (мм) вычисляют напряжение сдвига τ (кПа) и средний градиент скорости сдвига $\dot{\gamma}$ (с^{-1}) по формулам:

$$\tau = \frac{K \cdot P \cdot 1\,000}{h^2}; \quad (3)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{K_1 \cdot V_\kappa}{h}, \quad (4)$$

где V_κ – скорость погружения конуса.

Значения коэффициентов K и K_1 в зависимости от угла при вершине конуса α приведены в таблице.

Коэффициенты K и K_1 в зависимости от угла при вершине конуса

Коэффициент	Угол при вершине конуса α		
	30°	45°	60°
K	1,15	1,71	3,48
K_1	4,47	6,41	13,41

При измерении реологических характеристик материалов, свойства которых непрерывно изменяются во времени (например, вяжущих веществ), использовалась следующая методика. Из условия погружения конуса на глубину не менее 7 мм устанавливалась величина нагрузки P_1 . При этой нагрузке на одном образце не менее 6 раз измеряли глубину погружения конуса каждый раз в новой лунке. Измерения производили через определенные промежутки времени $t_{\text{пр}} = \frac{T}{6}$, где T – продолжительность периода, в течение которого намечали изучать влияние возраста смеси на реологические свойства.

Затем такие же измерения производили на других свежеприготовленных образцах-близнецах при нагрузках: P_2 (на втором образце), P_3 (третьем), P_4 (четвертом). Нагрузки на конус подбирали таким образом, чтобы соответствующие им глубины погружения были примерно равны 11, 15, 19 мм. Погружения выполняли через промежутки времени $t_{\text{пр}}$.

Закончив измерения на четырех образцах, вычисляли для каждой глубины погружения конуса h напряжение сдвига τ и строили зависимость τ от возраста смеси t (рис. 2).

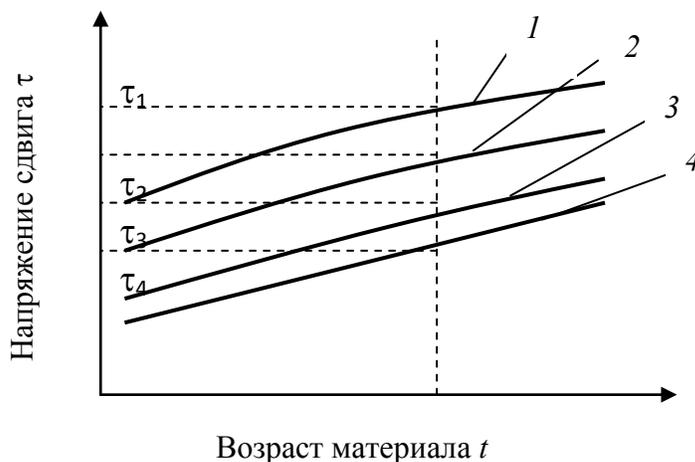


Рис. 2. Определение напряжения сдвига для материала с изменяющимися свойствами во времени: 1 – нагрузка на конус P_1 ; 2 – то же, P_2 ; 3 – то же, P_3 ; 4 – то же, P_4

Далее из точки на горизонтальной оси, соответствующей изучаемому возрасту смеси, восстанавливали перпендикуляр, пересекавший все линии на графике (см. рис. 2). В точках пересечения определяли значения напряжения сдвига $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$. По известным τ, P и K с помощью формулы (3) вычисляли четыре значения h_1, h_2, h_3 и h_4 , а с помощью выражения (4) – четыре значения скорости сдвига $\dot{\gamma}_1, \dot{\gamma}_2, \dot{\gamma}_3$ и $\dot{\gamma}_4$, после чего, пользуясь уравнением (2), – реологические характеристики (предельное напряжение сдвига τ_0 и вязкость η).

При наличии платформенных весов, снабженных микрометром и имеющих необходимую точность измерений нагрузки и перемещения подъемного столика с образцом (при этом требуется устройство компенсации смещения платформы самих платформенных весов в процессе измерения нагрузок), возможна более простая схема пенетрационного реометра (рис. 3). Методика определения реологических характеристик дисперсных сред с помощью такой установки не отличается от рассмотренной ранее на приборе ПРБ-2.

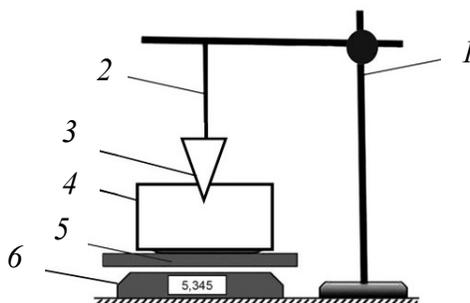


Рис. 3. Схема пенетрационного реометра на основе платформенных весов, снабженных микрометром: 1 – штатив; 2 – крепление конуса; 3 – конус; 4 – конус; 5 – платформенные весы; 6 – подвижный столик

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов В.В. Определение реологических свойств твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, с помощью конусной пенетрации. Часть 1. Теоретическое обоснование метода // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 2 (22). С. 72–82.
2. Ребиндер П.А., Семенов Н.А. О методике погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств пластично-вязких тел // *Доклады АН СССР*. 1949. Т. 14. № 6. С. 20–25.
3. Агранат Н.Н., Широков М.Ф. Теория метода определения предельного напряжения сдвига дисперсных систем погружением конуса // *Коллоидный журнал*. 1957. Т. 19. № 1. С. 9–13.
4. Ничипоренко С.П. Физико-химическая механика дисперсных структур в технологии строительной керамики. Киев: Наукова думка, 1968. 76 с.
5. Гораздовский Т.Я., Ребиндер П.А. К теории конического пластометра // *Коллоидный журнал*. 1970. Т. 32. № 4. С. 512–519.
6. Ямпольский Б.Я., Ребиндер П.А. Исследование структурно-механических свойств металлических дисперсных систем методом конического пластометра // *Коллоидный журнал*. 1948. Т. 6. С. 466–469.
7. Рандма Х.В. Зависимость структурной прочности суспензии молотого песка от ее концентрации // *Сб. тр. НИПИСиликатобетон*. 1973. № 7. С. 23–33.
8. Разоренов В.Ф. Пенетрационные испытания грунтов. М.: Стройиздат, 1968. 182 с.
9. Волосач А.В., Горовых О.Г. Результаты экспериментальных исследований поверхностной твердости ячеистых бетонов, подвергшихся температурному воздействию, инденторами с углами раствора конуса 20–55° // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2019. Т. 3. № 1. С. 13–22.
10. Берней И.И. Исследование структурно-механических пластично-вязких сред на конических пластометрах // *Строительные материалы*. 1973. № 7. С. 45–47.
11. Вялямяэ Г.Х., Гордон Б.И., Сеппель С.А. Автоматический конический пластометр КП-1. *Реология бетонных смесей и ее технологические задачи: Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума*. Рига: РПИ, 1979. С. 147–149.
12. Вялямяэ Г.Х., Гордон Б.И., Прооде Ю.И., Сеппель С.А., Тильк И.И., Уутма Т.Х., Эйнер Л.К. Универсальный пластометр типа REOSET-5. *Реология бетонных смесей и ее технологические задачи: Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума*. Юрмала: РПИ, 1982. С. 65–68.
13. Ряни А.Э., Рандма И.Ю., Куннос Г.Я., Рандма О.Х., Гордон В.Г. Методика исследования упруговязкой характеристики дисперсной системы при помощи конического индентора. *Реология бетонных смесей и ее технологические задачи: Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума*. Рига: РПИ, 1979. С. 150–152.
14. Ряни А.Э., Рандма О.Х., Рандма И.Ю., Охота С.В., Куннос Г.Я. Исследование реологических свойств строительных смесей методом релаксационной пенетрометрии. *Технологическая механика бетона: Межвуз. научн. сб.* Рига: РПИ, 1981. С. 17–26.
15. Берней И.И., Белов В.В. Влияние сил капиллярного сцепления на физико-механические свойства дисперсных систем // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1980. № 4. С. 73–77.

16. Берней И.И., Белов В.В. Теория и метод измерения вязкости и предельного напряжения сдвига дисперсных систем на усовершенствованном коническом пластометре. *Реология бетонных смесей и ее технологические задачи: Тезисы докладов III Всесоюзного симпозиума*. Рига: РПИ, 1979. С.144–146.
17. Берней И.И., Белов В.В. К теории определения вязкопластичных свойств дисперсных систем методом конического пластометра. *Технологическая механика бетона: Межвуз. научн. сб.* Рига: РПИ, 1981. С. 5–16.
18. Берней И.И., Белов В.В., Сафонов А.А. Пенетрационный реометр для исследования и контроля реологических свойств мелкозернистых дисперсных систем. *Ускорение научно-технического прогресса в промышленности строительных материалов и строительной индустрии: Тез. докл. Всесоюз. конф.* Белгород: БТИСМ, 1987. С. 23.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Белов В.В. Определение реологических свойств твердообразных дисперсных систем, применяемых в производстве строительных материалов, с помощью конусной пенетрации. Часть 2. Приборное обеспечение // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 3 (23). С. 70–78.

DETERMINATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF SOLID DISPERSED SYSTEMS USED IN THE PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS APPLYING CONE PENETRATION TECHNIQUE. PART 2. INSTRUMENTATION

V.V. Belov

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. The main problem in the use of conical plastometers is to obtain reliable rheological characteristics of dispersed systems. Most compacted three-phase systems used in the production of building materials are solid-like, in which the periods of restoration of broken bonds are reduced and thixotropy participates in the flow process covertly, being realized only while maintaining the state of destruction of internal bonds. Therefore, for such systems, it is necessary to use a method for determining rheological characteristics, based not on measuring stress relaxation parameters, but on the picture of the flow of the medium around the cone. The ultimate shear stress and viscosity of solid dispersed systems used in the production of building materials can be determined by cone immersion on a penetrational rheometer PRB-2 using a technique that is developed on the basis of a theory arising from an experimentally recorded pattern of deformation of the medium around the cone.

Keywords: structured dispersed systems, ultimate shear stress and viscosity, cone penetration method, cone rheometer.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

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

CITATION FOR AN ARTICLE

Belov V.V. Determination of rheological properties of solid dispersed systems used in the production of building materials applying cone penetration technique. Part 2. Instrumentation // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 3 (23), pp. 70–78.

УДК 546.57:543

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО РАСТВОРЕНИЯ СЕРЕБРА
ФЛУОРИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ
РАЗНОЛИГАНДНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ИМИДАЗОЛОМ**

С.Л. Горцевич¹, А.Е. Соболев^{1,2}, А.И. Пичугина¹, М.А. Эсауленко^{1,3}

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

²*Тверской государственный медицинский университет (г. Тверь)*

³*Тверское суворовское военное училище (г. Тверь)*

© Горцевич С.Л., Соболев А.Е.,
Пичугина А.И., Эсауленко М.А., 2024

Аннотация. В статье исследована возможность применения 2-(2-гидроксифенил)-4,5-дифенил-1Н-имидазола (имидазола, Im) для флуориметрического определения микроколичеств серебра в различных объектах. Разработана методика количественного и качественного анализа окислительного растворения серебра при образовании разнолигандных комплексов с применением флуориметрического метода с имидазолом. Данный метод был использован при изучении кинетики окисления серебра кислородом в присутствии тиомочевины и тиоцианата с комплексом железа(II) и этилендиаминтетрауксусной кислоты в качестве катализатора.

Ключевые слова: серебро, аналитическая химия, имидазол, флуориметрический метод, спектры флуоресценции, кинетика растворения, комплексообразование, разнолигандные комплексы.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-78-84

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы анализа микроколичеств серебра в геологических материалах, продуктах металлургии, вторичном сырье являются актуальной темой в области аналитической химии [1]. Многие методы либо недостаточно чувствительны, либо малоселективны и требуют предварительного выделения и концентрирования [2].

Совершенствование и интенсификация гидрометаллургических процессов извлечения серебра из руд и вторичного сырья базируются на изучении кинетики его растворения. Продолжаются поиски эффективных реагентов-растворителей, которые представляют собой водные растворы окислителя и лигандов. В таких системах могут образовываться прочные комплексы серебра, в результате происходит окисление металла, а также переход его в раствор. Применение кислорода в качестве окислителя исключает проблему регенерации реагентов.

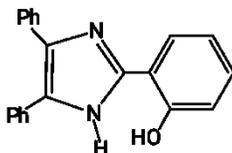
Для изучения кинетики растворения серебра к методике определения содержания серебра в растворах предъявляются следующие требования: высокая чувствительность, селективность, минимальная трудоемкость и высокая скорость анализа [3]. Выполнение этих условий возможно после модификации известных методик путем, например, использования флуориметрического метода определения серебра с имидазолом.

Цель данного исследования – определение возможности использования флуориметрического метода количественного анализа ионов серебра с имидазолом при изучении кинетики растворения серебра в системе «комплексант – окислитель».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являются методика флуориметрического определения серебра с имидазолом и кинетика растворения серебра в системе «тиомочевина – тиоцианат калия» путем окисления кислородом в присутствии комплекса железа(II) с этилендиаминтетрауксусной кислотой (ЭДТА).

В качестве комплексообразующих реагентов использовали 2-(2-гидроксифенил)-4,5-дифенил-1H-имидазол (имидазол, Im) [4, 5]:



Имидазол – это высокочувствительный реагент для флуориметрического определения микроколичеств серебра в различных объектах. Образующиеся комплексные соединения характеризуются большой прочностью и высокими значениями молярных коэффициентов поглощения.

Измерение оптической плотности растворов при фотометрическом и экстракционно-фотометрическом анализе проводили на спектрофотометре ПЭ-53008, а измерение рН растворов – на иономере И-160МИ. Инфракрасные спектры образцов получали на Фурье-спектрометре ФСМ 1201 (диапазон: 400–4 000 см⁻¹; разрешение: 4 см⁻¹; интерферометр с самокомпенсацией, детектор LiTaO₃) и приставкой диффузного отражения.

Кинетика растворения серебра изучалась на установке с вращающимся диском, состоящей из штатива с синхронным двигателем, позволяющим регулировать частоту вращения диска в диапазоне от 1,6 до 25 с⁻¹. Вращающийся вал с закрепленным образцом

металла погружают в раствор, находящийся в термостатированном реакторе емкостью 250 см³, снабженном системой для барботажа газов через реакционный раствор.

Для флуориметрического определения серебра с имидазолом аликвоту раствора объемом не более 10 см³, содержащую 2...20 мкг Ag(I), помещали в мерную колбу на 25 см³. Затем приливали 2,5 см³ ацетатного буфера с pH = 3,0, а также 10 см³ изопропилового спирта, 1,00 мл раствора имидазола в изопропанолу и доводили дистиллированной водой до 25 см³. Через 5 мин измеряли оптическую плотность раствора при $\lambda = 430$ нм в кювете толщиной 1 см относительно раствора холостого опыта.

Скорость растворения рассчитывали по результатам анализа проб растворов, полученных через определенные промежутки времени при взаимодействии металлического серебра с водным раствором реагентов в установке с вращающимся диском. Перед началом опыта образец готовили полированием на шлифовальной бумаге под слоем дистиллированной воды, добиваясь полной смачиваемости поверхности. Образец закрепляли на валу установки, в реактор заливали подготовленный раствор реагентов и устанавливали температурный режим термостата. После запуска двигателя и включения секундомера образец помещали в раствор. Через заданные промежутки времени пипеткой отбирали аликвоты раствора и направляли их на анализ для определения содержания серебра.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для установления возможности комплексообразования и определения состава комплексов ионов Ag (I) с имидазолом было произведено исследование спектров поглощения растворов ($C_{Me} = 10^{-5}$ моль/л) с варьируемыми соотношениями «металл – реагент». Спектры поглощения комплексов серебра с изученными реагентами представляли собой широкую полосу с одним максимумом светопоглощения при $\lambda = 342$ нм в системе «серебро – имидазол» (Ag – Im) и $\lambda = 340$ нм в системе «серебро – тиоцианат – имидазол» (Ag – SCN⁻ – Im). Сравнение спектров чистых реагентов и спектров их комплексов с ионами изученных металлов показало, что контрастность аналитической реакции составила 10–25 нм. Зависимость оптической плотности раствора с оптимальным соотношением «металл – реагент» от pH показывает, что комплексы ионов серебра с замещенными имидазолами в кислой среде образуются при pH = 5. В дальнейших анализах использовали 0,001 М раствора имидазола в количестве 3,00 см³ в 25 см³, что соответствует концентрации имидазола $12 \cdot 10^{-2}$ ммоль/л.

Градуировочная зависимость имеет следующий вид:

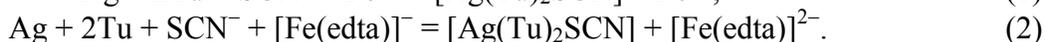
$$D = (0,62 \pm 0,02) \times C_{Ag} + (0,03 \pm 0,02).$$

Среднее значение молярного коэффициента поглощения $\epsilon = 1,52 \times 10^5$ л · моль⁻¹ · см⁻¹.

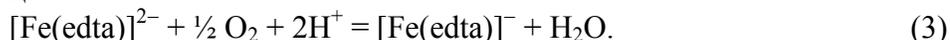
Экстракционно-флуориметрическое определение с имидазолом позволяет проводить анализ в растворах после разложения проб азотной кислотой без удаления следов оксидов азота. Многие ионы не мешают определению в связи с низким коэффициентом распределения при экстракции. Влияние меди удается устранить промывкой экстракта. При использовании данной методики время анализа сокращается в 2–3 раза.

Для изучения кинетики растворения серебра была выбрана методика с экстракцией серебра раствором имидазола. Преимуществом методики является одновременное выделение и определение серебра в сложных по составу системах, что существенно сокращает продолжительность анализа.

В настоящей работе изучен процесс окисления серебра в присутствии тиомочевины и тиоцианата калия, образующих смешаннолигандный комплекс Ag(I) $[\text{Ag}(\text{SCN}_2\text{H}_4)_2(\text{SCN})]$. В качестве окислителя использовали сульфат железа(III), комплекс железа(III) с ЭДТА $[\text{Fe}(\text{edta})]^-$ и комплекс железа(II) с ЭДТА $[\text{Fe}(\text{edta})]^{2-}$ при пропускании газообразного кислорода:



Продувка раствора кислородом приводит к быстрому окислению железа, которое вновь участвует в реакции с золотом:



Таким образом, железо может быть реагентом-окислителем (выражения (1) и (2)) и катализатором в присутствии молекулярного кислорода (выражение (3)).

Кинетика окислительного растворения серебра изучена методом вращающегося диска. Значения скоростей растворения серебра в присутствии комплекса Fe(III) с ЭДТА и Fe(II) с ЭДТА при продувке кислородом практически совпадают. В отсутствие ЭДТА ионы Fe(II) окисляются кислородом с низкой скоростью, что приводит к уменьшению скорости растворения в 8 раз.

С целью расчета кинетических характеристик процесса растворения серебра с образованием смешаннолигандных комплексов тиомочевины и тиоцианата в присутствии комплекса Fe(II) с ЭДТА и кислорода реализована серия кинетических опытов по методике планирования эксперимента. Область изменения параметров процесса: суммарная концентрация лигандов $[\text{Tu}] + [\text{Tcy}]$ 0,5–1,0 М; концентрация комплекса $[\text{Fe}(\text{edta})]^{2-}$ 0,01–0,02 М; частота вращения диска 1,6–10 c^{-1} ; температура 298–308 К. Во всех опытах через раствор пропускали увлажненный кислород. План эксперимента (полный факторный эксперимент (ПФЭ), равный 2^4) и результаты определения скоростей приведены в таблице.

Получена математическая модель процесса:

$$W = 32,04 \times e^{-46018/RT} \times [\text{Tu} + \text{Tcy}]^{1,1} \times [\text{Fe}(\text{edta})]^{0,3} \times n^{0,5}.$$

План полного факторного эксперимента построения регрессионной модели
процесса растворения серебра ($p(\text{O}_2) = 1$ атм)

№	$[\text{Tu} + \text{Tcy}]$, моль/л	$[\text{Fe}(\text{edta})]^{2-}$, моль/л	n , c^{-1}	T , К	$W \cdot 10^7$, моль \cdot $\text{дм}^{-3} \cdot \text{c}^{-1}$ (экспериментальное значение)	$W \cdot 10^7$, моль \cdot $\text{дм}^{-3} \cdot \text{c}^{-1}$ (расчетное значение)
1	1,0	0,02	10	308	5,160	4,579
2	1,0	0,02	10	298	2,430	2,505
3	1,0	0,02	1,6	308	1,680	1,963
4	1,0	0,02	1,6	298	0,840	1,074
5	1,0	0,01	10	308	3,232	3,730
6	1,0	0,01	10	298	2,320	2,041
7	1,0	0,01	1,6	308	1,600	1,600
8	1,0	0,01	1,6	298	1,215	0,875

Окончание таблицы

№	[Tu + Tcy], моль/л	[Fe(edta)] ²⁻ , моль/л	n, с ⁻¹	T, К	$W \cdot 10^7$, моль · дм ⁻³ · с ⁻¹ (экспериментальное значение)	$W \cdot 10^7$, моль · дм ⁻³ · с ⁻¹ (расчетное значение)
9	1,0	0,02	10	308	2,580	2,203
10	0,5	0,02	10	298	1,290	1,205
11	0,5	0,02	1,6	308	1,032	0,945
12	0,5	0,02	1,6	298	0,516	0,517
13	0,5	0,01	10	308	1,616	1,795
14	0,5	0,01	10	298	0,808	0,982
15	0,5	0,01	1,6	308	0,800	0,770
16	0,5	0,01	1,6	298	0,400	0,421

Константа скорости реакции составляла $2,75 \times 10^{-7}$ моль^{1,4} · дм^{-0,3} · с⁻¹, энергия активации – 46,0 кДж/моль. Процесс лимитирован диффузией комплексных соединений золота от реакционной поверхности в объем раствора.

Модель показывает зависимость скорости растворения от суммарной концентрации Tu и Tcy при [Tu] / [Tcy] = 1 по первому порядку. Зависимость от концентрации комплекса Fe(II) с ЭДТА равна 0,3. Это свидетельствует об избытке окислителя относительно содержания лиганда. Такие зависимости характерны для двух реагентов, участвующих в гетерогенной реакции. Влияние интенсивности перемешивания на скорость и показатель степени при частоте вращения диска 0,5 говорит о лимитировании суммарного процесса диффузионной стадией. Энергия активации, равная 46,0 кДж/моль, более характерна для реакций с замедленной химической стадией. Наиболее вероятное объяснение связано с тормозящим действием диффузии продукта реакции от поверхности диска в раствор. Скорость пропорциональна концентрации комплексов серебра в диффузионном слое на реакционной поверхности. В этом слое реализуется динамическое равновесие, концентрация продуктов в нем определяется высокой энергией активации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что флуоресцирующие комплексы серебра с имидазолом образуются в соотношении 1 : 1. Спектры флуоресценции расположены в длинноволновой области спектра ($\lambda_{\max} = 430$ нм); при комплексообразовании наблюдается батохромное смещение спектров эмиссии флуоресценции по отношению к спектру чистого реагента. В комплексах Ag–SCN–Im стоковское смещение составило 190 нм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пятницкий И.В., Сухан В.В. Аналитическая химия серебра. М.: Наука, 1975. 260 с.
2. Золотов Ю. А., Кузьмин Н.М. Концентрирование микроэлементов. М.: Химия, 1982. 288 с.
3. Луцик В.И., Соболев А.Е., Чурсанов Ю.В. Физико-химические методы анализа. Тверь: ТвГТУ, 2021. 212 с.
4. Бургер К. Органические реагенты в неорганическом анализе. М.: Мир, 1975. 272 с.

5. Хольцбехер З., Дивиш Л., Крал М., Шуха Л., Влчил Ф. Органические реагенты в неорганическом анализе. М.: Мир, 1979. 620 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОРЦЕВИЧ Светлана Леонидовна – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: svetagor_70@mail.ru

СОБОЛЕВ Александр Евгеньевич – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22; доцент кафедры химии ФГБОУ ВО «Тверской государственный медицинский университет» Минздрава России, 170000, г. Тверь, ул. Советская, д. 4. E-mail: also@live.ru

ПИЧУГИНА Анна Игоревна – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: idpo-chem-pichugina@bk.ru

ЭСАУЛЕНКО Мария Александровна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22; преподаватель химии ФГКОУ «Тверское суворовское военное ордена Почета училище Министерства обороны Российской Федерации», 170009, г. Тверь, ул. Игоря Баталова, д. 3. E-mail: xt-337@mail.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Горцевич С.Л., Соболев А.Е., Пичугина А.И., Эсауленко М.А. Исследование окислительного растворения серебра флуориметрическим методом при образовании разнолигандных комплексов с имидазолом // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 3 (23). С. 78–84.

INVESTIGATION OF THE OXIDATIVE DISSOLUTION OF SILVER BY THE FLUORIMETRIC METHOD IN THE FORMATION OF MULTI-LIGAND COMPLEXES WITH IMIDAZOLE

S.L. Gortsevich¹, A.E. Sobolev^{1,2}, A.I. Pichugina¹, M.A. Yesaulenko^{1,3}

¹Tver State Technical University (Tver)

²Tver State Medical University (Tver)

³Tver Suvorov Military College (Tver)

Abstract. In the article the possibility of using 2-(2-hydroxyphenyl)-4,5-diphenyl-1H-imidazole (imidazole, Im) for fluorimetric determination of silver microquantities in various objects is investigated. A technique for quantitative and qualitative analysis of the oxidative dissolution of silver during the formation of dissimilar ligand complexes using the fluorimetric method with imidazole was developed. This method was used to study the kinetics of silver oxidation by oxygen in the presence of thiourea and thiocyanate with a complex of iron(II) and ethylenediaminetetraacetic acid as a catalyst.

Keywords: silver, analytical chemistry, imidazole, fluorimetry method, fluorescence spectra, dissolution kinetics, complexation, multi-ligand complexes.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

GORTSEVICH Svetlana Leonidovna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: svetagor_70@mail.ru

SOBOLEV Alexander Evgenievich – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia; Associate Professor of the Department of Chemistry, Tver State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, 4, Sovetskaya Str., 170000, Tver. E-mail: also@live.ru

PICHUGINA Anna Igorevna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: idpo-chem-pichugina@bk.ru

YESAULENKO Maria Alexandrovna – Undergraduate student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia; Chemistry Teacher, Tver Suворov Military College of the Ministry of Defense of the Russian Federation, 3, Igor Batalov's Str., Tver, 170009, Russia. E-mail: xt-337@mail.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Gortsevich S.L., Sobolev A.E., Pichugina A.I., Yesaulenko M.A. Investigation of the oxidative dissolution of silver by the fluorimetric method in the formation of multi-ligand complexes with imidazole // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 3 (23), pp. 78–84.

УДК 544.773.2

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ГЕТЕРОЛИГАНДНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЗОЛОТА ПО ВЕЛИЧИНЕ ПОТЕНЦИАЛА ЗОЛОТОГО ЭЛЕКТРОДА

А.В. Старовойтов, С.Л. Горцевич, А.Е. Соболев, В.Ю. Долуда
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Старовойтов А.В., Горцевич С.Л.,
Соболев А.Е., Долуда В.Ю., 2024

Аннотация. Проведена качественная оценка прочности гетеролигандных комплексов золота относительно гомолигандных, которые образованы теми же лигандообразующими соединениями. Показана принципиальная возможность осуществления такой оценки путем измерения величины потенциала золотого электрода в растворах парных разнородных лигандообразующих реагентов. Сопоставление экспериментальных сведений с литературными данными показало их согласованность, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Ключевые слова: золото, гетеролигандные комплексы, кинетика растворения, синергетический эффект.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-84-89

ВВЕДЕНИЕ

Извлечение золота из природного сырья и технологических отходов довольно часто осуществляют гидрометаллургическими методами, среди которых главное место занимает цианирование. Основным недостатком цианидной технологии является высокая токсичность. Поиск эффективных бесцианидных составов выявил ряд альтернативных реагентов для растворения золота, но на данный момент ни один из них не способен полноценно конкурировать с цианидами. Тем не менее известно, что если в процессе растворения металла возможно образование гетеролигандных комплексов, которые отличаются более высокой прочностью относительно соответствующих гомолигандных, то растворение характеризуется синергетическим увеличением скорости [1, 2]. К сожалению, информация о гетеролигандных комплексах золота и их прочности сильно ограничена.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы предложить максимально простой способ качественной оценки относительной прочности гетеролигандных комплексов золота, который позволит с минимальными трудозатратами изучить широкий перечень водных растворов парных разнородных комплексообразующих реагентов на предмет перспективности использования конкретного состава для кинетических исследований процессов растворения золота.

МЕТОДЫ, МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ

Оценка прочности гетеролигандных комплексов золота осуществлялась потенциометрически. Потенциал золотого электрода измерен на многофункциональном иономере И-160МИ относительно насыщенного хлорсеребряного электрода сравнения. Диаметр золотого электрода – 10 мм. Суммарная концентрация лигандообразующих веществ (индивидуального лиганда или смеси) во всех растворах составляла 0,25 М. Измерения проведены согласно концепции максимального упрощения (минимизации трудозатрат): в водных растворах присутствуют только лигандообразующие вещества (т.е. естественный рН среды); отсутствуют термостатирование и удаление растворенного кислорода путем продувки инертным газом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Золото – благородный металл. Окислительный потенциал золота в водных растворах высок:



Требуются чрезвычайно большие затраты энергии, чтобы перевести данный металл в состояние простого иона. Не удастся это сделать даже при добавлении очень сильных окислителей. Однако, как следует из уравнения Нернста, потенциал металла в растворе его соли зависит от активности ионов этого металла:

$$\varphi = \varphi_0 + (RT/nF) \cdot \ln a_{Me^{n+}}, \quad (3)$$

где φ – потенциал металла в растворе его соли, В; φ_0 – стандартный потенциал металла, В; R – газовая постоянная, $R = 8,314$ Дж / (моль · К); T – температура, К; n – число электронов,

принимающих участие в реакции; F – число Фарадея, $F = 96\,500$ Кл/моль; a_{Me}^{n+} – активность катионов металла в растворе. Например, для золота, используя выражение (1), подставляя постоянные и переходя от натуральных логарифмов к десятичным, получим

$$\varphi = 1,68 + 0,059 \cdot \lg a_{Au}^{+}. \quad (4)$$

Данное уравнение показывает, что потенциал окисления золота снижается при уменьшении активности ионов Au^{+} в растворе. Это обстоятельство и лежит в основе процесса растворения золота в растворах, содержащих лигандообразующие соединения. Если ионы Au^{+} образуют с лигандообразующими реагентами L (которые представляют собой ионы или молекулы) достаточно прочные комплексы, то равновесие при взаимодействии



сильно сдвинуто вправо, т.е. происходит связывание ионов Au^{+} в виде комплексных соединений. Благодаря комплексообразованию уменьшается активность ионов Au^{+} и, как следует из уравнения (4), снижается окислительный потенциал золота. Чем выше прочность образуемого комплекса золота, тем более значительно снижение потенциала окисления металла (т.е. тем отрицательнее потенциал золотого электрода).

Влияние состава водного раствора на значение потенциала золотого электрода показано в таблице. В ячейках, идущих по диагонали (с более толстыми границами), представлены потенциалы золотого электрода в растворах индивидуальных лигандов. Надписью «Окисление» отмечены растворы, где стабильное значение электродного потенциала не устанавливается из-за реакции окисления малостабильного лигандообразующего соединения молекулярным йодом, который, в свою очередь, образуется из-за взаимодействия ионов йода с растворенным кислородом воздуха.

Потенциалы золотого электрода (мВ) в различных составах лигандообразующих реагентов относительно насыщенного хлорсеребряного электрода

$L_1 = 0,125M$ $L_2 = 0,125M$	$SC(NH_2)_2$	$S_2O_3^{2-}$	SCN^{-}	SO_3^{2-}	Глицин	Таурин	NH_3	Γ
$SC(NH_2)_2$	-189,3	-238,2	-138,3	-240,9	-128,2	-144,3	–	Окисление
$S_2O_3^{2-}$	–	-87,7	-86,4	-151,6	-10,9	-70,6	-166,4	Окисление
SCN^{-}	–	–	42,8	-107,7	30,2	-33,9	–	61,6
SO_3^{2-}	–	–	–	-94,2	-116,3	-120,9	-159,3	Окисление
Глицин	–	–	–	–	27,0	-85,3	-89,5	88,1
Таурин	–	–	–	–	–	-77,5	-80,2	91,2
NH_3	–	–	–	–	–	–	-180,8	–
Γ	–	–	–	–	–	–	–	69,2

Вывод о более высокой прочности гетеролигандных комплексов золота (по сравнению с соответствующими гомолигандными комплексами) делается, если потенциал

для смеси более отрицателен, чем наиболее отрицательный из двух потенциалов, которые относятся к соответствующим индивидуальным лигандам ($\Delta U = U_{\text{смеси}} - U_{\text{инд}}$). Среди множества изученных смешаннолигандных составов снижение потенциала золотого электрода в присутствии одновременно двух различных лигандов ярко проявилось только в трех растворах: $\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + \text{SO}_3^{2-}$ ($\Delta U = -57,4$ мВ), $\text{SC}(\text{NH}_2)_2 + \text{SO}_3^{2-}$ ($\Delta U = -51,64$ мВ) и $\text{SC}(\text{NH}_2)_2 + \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ($\Delta U = -48,9$ мВ). Следовательно, в них образуются гетеролигандные комплексы золота, которые прочнее соответствующих гомолигандных.

Необходимо отметить, что к значениям потенциалов нужно относиться скептически, так как в угоду минимизации трудозатрат при организации эксперимента многим важным аспектам не было уделено должного внимания (например, удалению растворенного кислорода воздуха для ограничения влияния окислительно-восстановительной реакции с ним на потенциал золотого электрода; подтверждению обратимости реакции (5), а также ряду других, менее значимых деталей). Для проверки достоверности и адекватности выводов о прочности гетеролигандных комплексов золота, сделанных на основании анализа экспериментальных данных, было проведено сопоставление данных выводов с литературными источниками. В последних содержатся как непосредственные сведения о прочности гетеролигандных комплексов, так и косвенная оценка прочности через кинетику растворения золота. В статье [3] сообщается, что при одновременном присутствии в растворе тиосульфат- и сульфит-ионов (системы $\text{S}_2\text{O}_3^{2-} + \text{SO}_3^{2-}$) образуются смешаннолигандные комплексы золота, которые прочнее гомолигандных (тиосульфитного или сульфитного). Статья [4] посвящена изучению процесса электрохимического растворения золота в щелочных тиомочевинных и сульфитных средах. В ней показано, что в растворах индивидуальных реагентов (только в тиомочевинной или только в сульфитной среде) растворения золота не происходит, но добавление даже небольшого количества второго лигандообразующего компонента приводит к активному растворению металла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сопоставление с независимыми источниками подтверждает выводы о прочности гетеролигандных комплексов золота. Следовательно, предложенный упрощенный способ потенциометрической оценки прочности гетеролигандных комплексов золота обладает приемлемой степенью достоверности получаемых результатов. Проведенное нами исследование кинетики растворения золота перспективным смешаннолигандным составом $\text{SC}(\text{NH}_2)_2 + \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ [5] показало наличие синергетического увеличения скорости растворения металла, которое более чем в 30 раз превысило ожидаемое значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чурсанов Ю.В., Поташников Ю.М., Горцевич С.Л. Кинетика окисления серебра кислородом в растворах, содержащих смеси тиоцианат-тиомочевина и тиоцианат-тиосульфат // *Журнал физической химии*. 2007. Т. 81. № 1. С. 228–230.
2. De Marco D., Bellomo A., De Robertis A. Formation and Thermodynamic Properties of Ag(I) Complexes with $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, SCN_2H_4 and SCN^- as Ligands // *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*. 1980. V. 42. No. 4. P. 599–609.
3. Perera W.N., Senanayake G., Nicol M.J. Interaction of Gold(I) with Thiosulfate-sulfite Mixed Ligand Systems // *Inorganica Chimica Acta*. 2005. V. 358. P. 2183–2190.

4. Шевцова О.Н., Зелинский А.Г., Бек Р.Ю. Микрогравиметрическое исследование процесса растворения золота в щелочных сульфитно-тиокарбамидных электролитах // *Электрохимия*. 2009. Т. 45. № 7. С. 878–883.
5. Старовойтов А.В., Чурсанов Ю.В., Луцки В.И. Кинетика растворения золота в водной системе тиомочевина-тиосульфат с окислителем Fe(III) ЭДТА // *Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология»*. 2018. Т. 61. № 12. С. 94–100.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

СТАРОВОЙТОВ Анатолий Владимирович – старший преподаватель кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: avstarovoytov7@yandex.ru

ГОРЦЕВИЧ Светлана Леонидовна – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: svetagor_70@mail.ru

СОБОЛЕВ Александр Евгеньевич – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: also@live.ru

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Старовойтов А.В., Горцевич С.Л., Соболев А.Е., Долуда В.Ю. Оценка прочности гетеролигандных комплексов золота по величине потенциала золотого электрода // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2024. № 3 (23). С. 84–89.

ASSESSMENT OF THE STRENGTH OF HETEROLIGAND GOLD COMPLEXES BY THE POTENTIAL OF THE GOLD ELECTRODE

A.V. Starovoitov, S.L. Gortsevich, A.E. Sobolev, V.Yu. Doluda
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. A qualitative assessment of the strength of heteroligand gold complexes relative to homoligand gold complexes formed by the same ligand-forming compounds is carried out. The fundamental possibility of implementing such an assessment by measuring the value of the gold electrode potential in solutions of paired heterogeneous ligand-forming reagents is shown. Comparison of experimental data with literature data showed their consistency, which confirms the reliability of the results obtained.

Keywords: gold, heteroligand complexes, dissolution kinetics, synergistic effect.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

STAROVOITOV Anatoly Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: avstarovoytov7@yandex.ru

GORTSEVICH Svetlana Leonidovna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: svetagor_70@mail.ru

SOBOLEV Alexander Evgenievich – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: also@live.ru

DOLUDA Valentin Yuryevich – Doctor of Chemical Sciences, Head of Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: doludav@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Starovoitov A.V., Gortsevich S.L., Sobolev A.E., Doluda V.Yu. Assessment of the strength of heteroligand gold complexes by the potential of the gold electrode // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 3 (23), pp. 84–89.

УДК 544.773.2**АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПЕН**

*Г.А. Туманов, А.В. Старовойтов, Е.И. Лагусева,
К.В. Чалов, А.И. Пичугина, В.Ю. Долуда*

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Туманов Г.А., Старовойтов А.В., Лагусева Е.И.,
Чалов К.В., Пичугина А.И., Долуда В.Ю., 2024

Аннотация. В статье рассмотрена возможность определения стойкости пены пенообразующих растворов в лабораторных условиях с целью приведения получаемых результатов в соответствие с данными, установленными по ГОСТ Р 50588-93. Время оседания половины столба пены измерялось с использованием установки, состоящей из цилиндра с нижней подачей воздуха и секундомера. В мерный цилиндр вносилась порция пенообразователя, после чего продувался воздух до образования устойчивого столба пены. Увеличение времени обработки пенообразующего раствора до 5 мин способствовало увеличению времени оседания пены до 460 с. При дальнейшем увеличении времени обработки пенообразователя воздухом до 10 мин наблюдался сдвиг максимума времени осаждения 50 % столба пены до расхода воздуха в 150 мл/мин. Оптимальное время обработки пенообразующего раствора составляло 10 мин при расходе воздуха 150 мл/мин. Сделан вывод, что при объеме пенообразователя от 30 до 60 мл полученные значения

времени оседания 50 % столба пены входят в интервал значений, приведенных в ГОСТ Р 50588-93.

Ключевые слова: устойчивость, пена, время оседания пены, стабильность, скорость оседания пены.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-89-94

ВВЕДЕНИЕ

Определение устойчивости пены является важной задачей аналитической химии. За счет этого обеспечивается соответствие выпускаемой продукции различным стандартам качества [1], а кроме того, определение устойчивости пены широко применяется в научных исследованиях [2–5]. В настоящее время используется ГОСТ Р 50588-93 [1], в котором предложено измерение времени разрушения 50 % столба пены в емкости объемом 200 дм³, а в качестве результата принято среднеарифметическое значение двух последовательно проведенных экспериментов, не отличающихся друг от друга более чем на 10 %. Основной недостаток вышеуказанного метода – необходимость приготовления большого объема пены, что не всегда возможно в лабораторных условиях. В методе определения устойчивости пены по ГОСТ 6948-81 для образования пены 100 мл пенообразующего раствора помещают в стакан и вспенивают раствор высокоскоростной мешалкой при 4 000 об/мин в течение 30 с, после чего измеряют время оседания 50 % столба пены. При этом вышеуказанный метод не в полной мере отражает физическую сущность образования пены в воздушных пеноформирователях, где раствор пенообразователя вспенивается в сопле высокоскоростным напором воздуха. В международном стандарте ASTM-D892-2018 [6] предложен способ образования пены путем пропускания воздуха через мерный цилиндр, а также замер оставшейся высоты столба после 10 мин отстаивания без подачи воздуха. Названный метод также имеет существенный недостаток, который заключается в невозможности соотнесения полученных результатов с данными российских стандартов. В связи с этим объединение вышеуказанных методов с пропусканием воздуха через цилиндр с пенообразователем и измерение времени оседания 50 % столба пены может быть приемлемо как с позиции физической сущности процесса, так и с позиции получаемых результатов. Кроме того, создание лабораторного метода, имеющего результаты, сравнимые с результатами, получаемыми по ГОСТ Р 50588-93 [1], существенно упростит проведение лабораторного анализа на определение устойчивости пены.

МЕТОДЫ, МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ

Для проведения экспериментов по изучению устойчивости пены были подготовлены пенообразующие растворы. Определение времени оседания пены производилось с использованием цилиндра с нижней подачей воздуха, при этом устанавливалось время оседания 50 % столба пены. В мерный цилиндр наливалось 20–70 мл приготовленного пенообразующего раствора, после чего через него в течение 3, 5 и 10 мин продувался воздух с расходом 50, 100, 150, 200 мл/мин. Измерение времени оседания пены производилось до получения трех последовательно сходящихся значений при температуре 20 °С. Был исследован пенообразующий водный раствор, содержащий 1 мас.% децилсульфата натрия, 0,5 мас.% сульфэтаксилата натрия, 0,1 мас.% бутанола, 0,1 мас.% лигносульфоната технического. Для сравнения полученных результатов

пенообразующая способность вышеуказанного раствора была определена по ГОСТ Р 50588-93 [1].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

По итогу проделанной работы построен график зависимости времени оседания 50 % столба пены от объемного расхода воздуха при времени продувки от 3 до 10 мин (рис. 1).

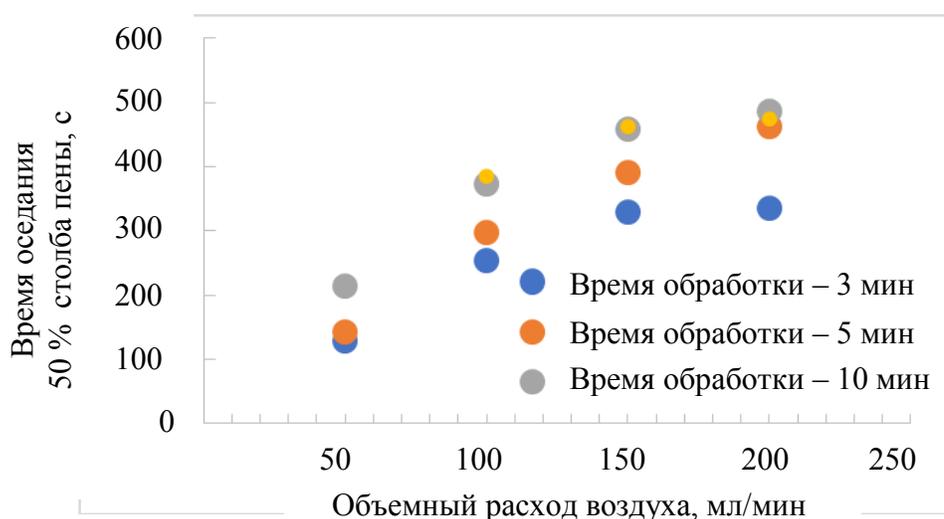


Рис. 1. Зависимость времени оседания половины столба пены от объемного расхода воздуха

В ходе обработки пенообразующего раствора в течение 3 мин при увеличении расхода воздуха с 50 до 200 мл/мин наблюдается увеличение времени оседания половины столба пены со 130 до 330 с. При этом стабилизация получаемых значений времени происходит при расходе 150 мл/мин. Если время обработки пенообразующего раствора увеличивается до 5 мин, наблюдается увеличение времени оседания 50 % столба пены до 460 с. При этом максимальное время достигается при расходе воздуха 200 мл/мин. Дальнейшее увеличение времени обработки пенообразующего раствора воздухом до 10 мин способствует сдвигу достижения максимума времени осаждения 50 % столба пены до расхода воздуха 150 мл/мин. Увеличение времени обработки пенообразующего раствора до 15 мин не приводит к существенному сдвигу во времени деструкции половины столба пены. В связи с этим можно считать оптимальным время обработки раствора 10 мин, причем измеренное время оседания 50 % столба пены составляет 460–465 с. Необходимо отметить, что время оседания пены, измеренное по ГОСТ Р 50588-93 [1] для вышеуказанного пенообразующего раствора, составило 549 ± 25 с, что означает наличие некоторой разницы в условиях оседания пены. Для достижения равенства времени оседания 50 % столба пены в лабораторных условиях и по нормам ГОСТ Р 50588-93 [1] были проведены эксперименты при варьировании количества пенообразующего раствора с 20 до 70 мл (рис. 2). Обработка раствора проводилась при расходе воздуха 150 мл/мин и времени обработки 10 мин.

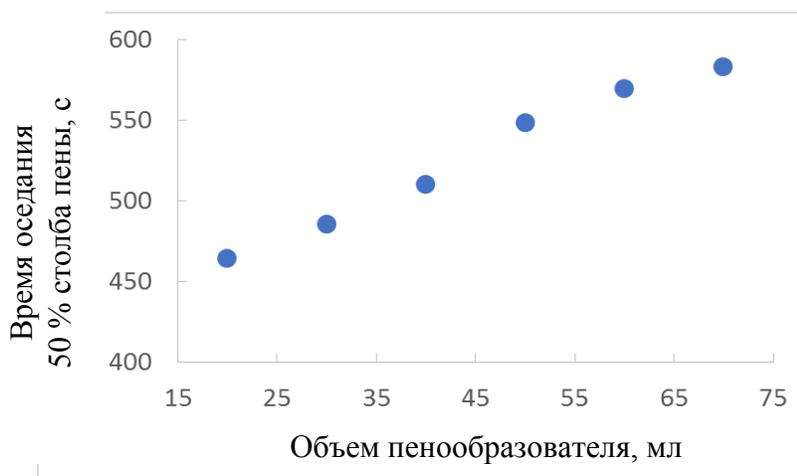


Рис. 2. Зависимость времени оседания 50 % столба пены от исходного объема пенообразователя

Увеличение объема пенообразователя с 10 до 60 мл закономерно приводит к увеличению времени оседания половины столба пены, что является следствием образования большего количества пены. При указанном объеме пенообразователя полученные значения времени оседания 50 % столба пены входят в интервал значений, установленных по ГОСТ Р 50588-93 [1].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проведены исследования влияния времени обработки, объемного расхода воздуха и объема пенообразователя на время оседания 50 % столба пены. Необходимо отметить, что увеличение времени обработки пенообразующего раствора способствует увеличению времени оседания 50 % столба пены. Максимальное время достигается при расходе воздуха в 200 мл/мин, а дальнейшее увеличение времени обработки пенообразующего раствора воздухом способствует сдвигу максимума времени осаждения 50 % столба пены. При расходе воздуха 150 мл/мин приемлемое время обработки пенообразующего раствора составляет 10 мин. При объеме пенообразователя от 30 до 60 мл полученные значения времени оседания 50 % столба пены соответствуют значениям, установленным по ГОСТ Р 50588-93 [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 50588-93. Пенообразователи для тушения пожаров. М.: Издательство стандартов, 1993. 14 с.
2. ГОСТ 6948-81. Пенообразователь ПО-1. Технические условия. М.: ФГУП Стандартинформ, 1981. 51 с.
3. The Effects of Acr/Mah Ionic Cross-linking on the Cell Morphology, Mechanical Properties, and Dimensional Stability of PVC Foams / J. Guo [et al.] // *Polym Degrad Stab.* 2024. Vol. 229. P. 1–25.
4. Experimental Study of Foam Stability and Interfacial Behaviour of Cellulose Nanocrystals-enhanced C22-tailed Zwitterionic Betaine Surfactant / Y. Li [et al.] // *Journal of Molecular Liquids. Elsevier.* 2024. Vol. 414. P. 62–84.

5. Synergistic Enhancement of Foam Stability by Nanocellulose and Hydrocarbon Surfactants / Q. Li [et al.] // *Chem Eng Sci. Elsevier Ltd.* 2024. Vol. 299. P. 35–42.
6. ASTM-D892-2018. Standard Test Method for Foaming Characteristics of Lubricating Oils. 2018. URL: <https://www.astm.org/d0892-18.html> (дата обращения: 25.07.2024).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТУМАНОВ Григорий Алексеевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: xt-337@mail.ru

СТАРОВОЙТОВ Анатолий Владимирович – старший преподаватель кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: avstarovoytov7@yandex.ru

ЛАГУСЕВА Елена Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: lagusseva@yandex.ru

ЧАЛОВ Кирилл Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tschalov_k@mail.ru

ПИЧУГИНА Анна Игоревна – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: idpo-chem-pichugina@bk.ru

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Туманов Г.А., Старовойтов А.В., Лагусева Е.И., Чалов К.В., Пичугина А.И., Долуда В.Ю. Аналитические особенности определения устойчивости пен // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 3 (23). С. 89–94.

ANALYTICAL FEATURES OF STUDY OF FOAM STABILITY

*G.A. Tumanov, A.V. Starovoytov, E.I. Laguseva,
K.V. Chalov, A.I. Pichugina, V.Yu. Doluda
Tver State Technical University (Tver)*

Abstract. The article considers the possibility of determining the foam resistance of foam-forming solutions in laboratory conditions in order to bring the results obtained in accordance with the data established by GOST R 50588-93. The time of settling of half of the foam column was measured using an installation consisting of a cylinder with a lower air supply and a stopwatch. A portion of the blowing agent was introduced into the measuring cylinder, after which air was blown until a stable foam column was formed. Increasing the processing time of the foaming solution up to 5 min contributed to the increase of the foam settling time up to 460 s. On further increasing the blowing agent treatment time with air up to 10 min, a shift in the

maximum settling time of 50 % of the foam column was observed up to an air flow rate of 150 ml/min. The optimum treatment time of the foaming solution was 10 min at an air flow rate of 150 ml/min. It is concluded that at the volume of the foaming agent from 30 to 60 ml the obtained values of the settling time of 50 % of the foam column fall within the range of values given in GOST R 50588-93.

Keywords: stability, foam, foam settling time, stability, foam settling velocity.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

TUMANOV Grigory Alekseevich – Postgraduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: xt-337@mail.ru

STAROVOITOV Anatoly Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: avstarovoytov7@yandex.ru

LAGUSEVA Elena Ivanovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: laguseva@yandex.ru

CHALOV Kirill Vyacheslavovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tschalov_k@mail.ru

PICHUGINA Anna Igorevna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: idpo-chem-pichugina@bk.ru

DOLUDA Valentin Yuryevich – Doctor of Chemical Sciences, Head of Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: doludav@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Tumanov G.A., Starovoitov A.V., Laguseva E.I., Chalov K.V., Pichugina A.I., Doluda V.Yu. Analytical features of study of foam stability // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 3 (23), pp. 89–94.

УДК 544.773.2

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
УСТОЙЧИВОСТИ ПЕН**

*Г.А. Туманов, А.В. Старовойтов, Е.И. Лагусева,
К.В. Чалов, Н.Ю. Старовойтова, В.Ю. Долуда
Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Туманов Г.А., Старовойтов А.В., Лагусева Е.И.,
Чалов К.В., Старовойтова Н.Ю., Долуда В.Ю., 2024

Аннотация. В статье рассмотрены практические и теоретические вопросы определения времени оседания пен для пожаротушащих растворов. Исследованы водные пенообразующие растворы, содержащие 1–2 мас.% децилсульфата натрия, 0,5–2 мас.% сульфозтаксилата натрия, 0,1–0,5 мас.% бутанола, 0,1–0,5 мас.% лигносульфаната технического. Определение времени оседания пены производилось по времени оседания 50 % столба пены. Для этого в мерный цилиндр наливалось 20 мл приготовленного пенообразующего раствора, после чего через него в течение 3 мин продувался воздух с расходом 50, 100, 150, 200 мл/мин. Найдена зависимость времени оседания половины столба пены от комплекса $\frac{\mu\tau_0}{g\rho}$, которая описывается степенной функцией $\tau^{1/2} = 2,3556(\mu\tau_0 / (g\rho))^{-0,211}$ с достоверностью аппроксимации 95 %. Сделан вывод, что обеспечение приемлемой устойчивости пены возможно для значений комплекса $\frac{\mu\tau_0}{g\rho}$ не более $10^{-9} \text{ м}^2 \cdot \text{с}$.

Ключевые слова: устойчивость, пена, время оседания пены, стабильность, скорость оседания пены.

DOI: 10.46573/2658-7459-2024-3-95-100

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время пены нашли широкое применение в различных областях экономики, техники, народного хозяйства [1]. Стабильные пены позволяют получать качественные пенобетонные строительные и пенонаполненные теплоизоляционные материалы, противопожарные пены, муссы и суфле, а также пористые медицинские материалы и сорбенты [1–6]. При этом вопросы определения устойчивости пен остаются актуальными, так как их стабильность является одним из основополагающих показателей обеспечения качества вышеуказанных изделий и продуктов. Таким образом, изучение вопросов определения устойчивости пен – это актуальная задача современной химии и химической технологии.

На устойчивость пен основное влияние оказывает равновесие между разницей давления внутри и вне ячейки пены и поверхностным натяжением (рис. 1), стремящимся уменьшить площадь поверхности ячейки пены.

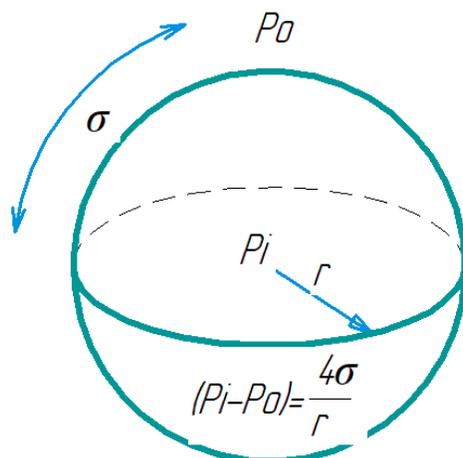


Рис. 1. Модель пузырька пены и основных сил, действующих на него

Изменение давления в пузырьке может быть рассчитано по закону Юнга – Лапласа $\Delta P = 4\sigma/r$, где ΔP – разница давления внутри и снаружи пузырька; σ – поверхностное натяжение на поверхности раздела фаз, Н/м; r – радиус пузырька, м. При этом поверхностное натяжение стремится минимизировать размеры пузырька, а внутреннее давление противостоит этому процессу. На устойчивость пузырьков пены влияет целый спектр внешних условий, таких как количество поверхностно-активного вещества, число стабилизирующих добавок, температура и т.п. Применяя закон Пуазеля, возможно получить уравнение, удовлетворительно описывающее время схлопывания отдельного пузырька пены [7] при начальных значениях толщин пленки:

$$t = 17,92 \frac{\mu r_0}{g\rho} \left[\frac{1}{\delta_f^2} - \frac{1}{\delta_i^2} \right], \quad (1)$$

где μ – вязкость жидкой фазы пены, Па · с; r_0 – исходный радиус пузырька пены, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность жидкой фазы пены, кг/м³; δ_f – конечная толщина пленки пены, м; δ_i – начальная толщина пленки пены, м;

В случае использования вышеуказанного уравнения для реальной пены возможно привести его к виду

$$t = k \frac{\mu r_0}{g\rho}, \quad (2)$$

где k – эффективная константа оседания пены, 1/м².

В более общем виде можно выразить зависимость в виде уравнения

$$t = f\left(\frac{\mu r_0}{g\rho}\right). \quad (3)$$

Для определения константы оседания пены необходимо построить график зависимости времени оседания пены от симплекса $\frac{\mu r_0}{g\rho}$ и установить практически время оседания пены. При этом вместо радиуса конкретного пузырька можно использовать средний радиус пузырьков, который может быть определен фотографическим методом для каждого конкретного случая. Варьирование среднего радиуса пузырьков пены возможно за

счет изменения интенсивности подачи пенообразующего агента. Кроме того, изменяя количество добавляемого в воду пенообразователя, можно изменять вязкость и плотность пенообразующего раствора. При этом меняется время оседания пены.

МЕТОДЫ, МЕТОДИКИ И МАТЕРИАЛЫ

Для проведения экспериментов по изучению устойчивости пены были подготовлены пенообразующие растворы. Определение времени оседания пены производилось с использованием установки (рис. 2), при этом находилось время оседания 50 % столба пены. В мерный цилиндр наливалось 20 мл приготовленного пенообразующего раствора, после чего через него в течение 3 мин продувался воздух с расходом 50, 100, 150, 200 мл/мин. Измерение времени оседания для каждого характеристического значения $\frac{\mu\tau_0}{g\rho}$ производилось до получения трех последовательно сходящихся значений при температуре 20 °С. Средний диаметр пузырьков определялся по изображению столба пены после фотографирования. При этом использовалась программа Scion Image.

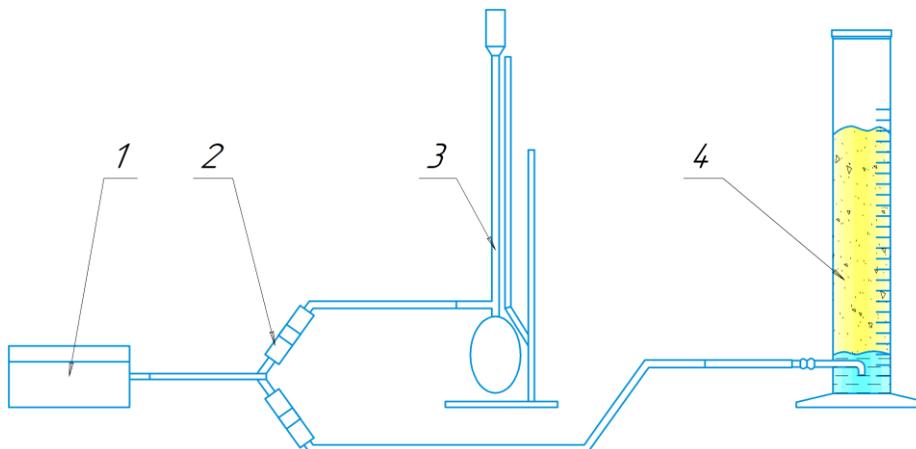


Рис. 2. Установка для изучения времени оседания пены:

1 – микрокомпрессор; 2 – регулирующие подачу воздуха зажимы;
3 – мыльно-пенный расходомер; 4 – мерный цилиндр с внутренней трубкой

Были получены пенообразующие растворы, содержащие следующие компоненты: 1–2 мас.% децилсульфата натрия; 0,5–2 мас.% сульфозтаксилата натрия; 0,1–0,5 мас.% бутанола; 0,1–0,5 мас.% лигносульфаната технического. Оставшуюся часть составляла вода.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В результате проведенной экспериментальной работы был получен график зависимости времени оседания 50 % столба пены от симплекса $\frac{\mu\tau_0}{g\rho}$ (рис. 3).

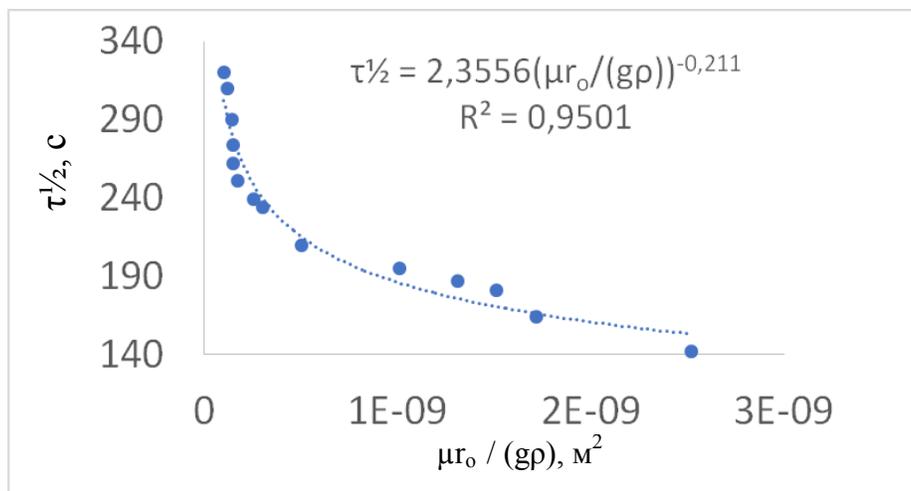


Рис. 3. Зависимость времени оседания
половины столба пены от симплекса $\frac{\mu\gamma_0}{gr}$

Полученная зависимость может быть описана степенной функцией $\tau^{1/2} = 2,3556(\mu\gamma_0 / (gr))^{-0,211}$, достоверность аппроксимации при этом составляет 95 %. Общий вид функции обусловлен видом уравнения (1), где зависимость квадрата толщины пленки пены имеет гиперболический характер. При этом толщина пленки пены для конкретных приготовленных растворов существенно зависит от радиуса пузырька пены. Время оседания пены существенно уменьшается с 300 до 200 с при увеличении значений комплекса $\frac{\mu\gamma_0}{gr}$ с 10^{-10} до $5 \cdot 10^{-10} m^2 \cdot c$. После этого время оседания пены изменяется не столь большими темпами и уменьшается до значений 140 с при увеличении значений комплекса $\frac{\mu\gamma_0}{gr}$ до $2,5 \cdot 10^{-9} m^2 \cdot c$. Таким образом, для получения максимальной устойчивости пены можно использовать пенообразующие растворы и условия пенообразования, обеспечивающие комплекс $\frac{\mu\gamma_0}{gr}$ больше $10^{-9} m^2 \cdot c$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были проведены эксперименты по определению устойчивости образцов пены для растворов, содержащих децилсульфат натрия, сульфэтаксилат натрия, бутанол, лигносульфанат. Выявили зависимость времени оседания половины столба пены от комплекса $\frac{\mu\gamma_0}{gr}$, которая выражается функцией $\tau^{1/2} = 2,3556(\mu\gamma_0 / (gr))^{-0,211}$ с достоверностью аппроксимации 95 %. Установили, что обеспечение приемлемой устойчивости пены для растворов пенообразователя со значениями функции $\frac{\mu\gamma_0}{gr}$ не более $10^{-9} m^2 \cdot c$ может быть получено путем подбора состава растворов с требуемыми диапазонами вязкостей и плотностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chickpea Aquafaba Production Techniques for Foaming: A Comparison of Foam Stability Considering the Use of Soaking Water, Additives, Pressure Cooking Time, pH, and Protein Content / L.T. Lima [et al.] // *LWT. Academic Press*. 2024. Vol. 207. P. 116643.
2. The effects of ACR/MAH ionic cross-linking on the cell morphology, mechanical properties, and dimensional stability of PVC foams / J. Guo [et al.] // *Polym Degrad Stab*. 2024. Vol. 229. P. 124–148.
3. Effect of Cold-cap-bottom Shear Stress on Primary Foam Stability / P. Hrma [et al.] // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2024. Vol. 646. P. 123262.
4. Experimental study of foam stability and interfacial behaviour of cellulose nanocrystals-enhanced C22-tailed zwitterionic betaine surfactant / Y. Li [et al.] // *Journal of Molecular Liquids*. 2024. Vol. 414. P. 62–84.
5. Experimental investigation on the stability and heat transfer enhancement of phase change materials composited with nanoparticles and metal foams / B. Yang [et al.] // *Journal of Energy Storage*. 2024. Vol. 89. P. 683–704.
6. Synergistic Enhancement of Foam Stability by Nanocellulose and Hydrocarbon Surfactants / Q. Li [et al.] // *Chemical Engineering Science*. 2024. Vol. 299. P. 321–336.
7. Shearer L.T., Akers W.W. Foam Stability // *Journal of Physical Chemistry. American Chemical Society*. 1958. Vol. 62. No. 10. P. 1264–1268.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТУМАНОВ Григорий Алексеевич – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: xt-337@mail.ru

СТАРОВОЙТОВ Анатолий Владимирович – старший преподаватель кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: avstarovoytov7@yandex.ru

ЛАГУСЕВА Елена Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: lagusseva@yandex.ru

ЧАЛОВ Кирилл Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: tschalov_k@mail.ru

СТАРОВОЙТОВА Наталья Юрьевна – кандидат химических наук, доцент кафедры химии и технологии полимеров, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: starovoytovanu@gmail.com

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Туманов Г.А., Старовойтов А.В., Лагусева Е.И., Чалов К.В., Старовойтова Н.Ю., Долуда В.Ю. Экспериментальное определение устойчивости пен // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2024. № 3 (23). С. 95–100.

EXPERIMENTAL STUDY OF FOAM STABILITY

**G.A. Tumanov, A.V. Starovoitov, E.I. Laguseva,
K.V. Chalov, N.Yu. Starovoitova, V.Yu. Doluda**
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. In the article practical and theoretical issues of determining the settling time of foams for fire extinguishing solutions are considered. Aqueous foam-forming solutions containing 1–2 wt.% sodium decylsulfate, 0,5–2 wt.% sodium sulfoethoxylate, 0,1–0,5 wt.% butanol, 0,1–0,5 wt.% lignosulfonate technical were investigated. The foam settling time was determined by the settling time of 50 % of the foam column. For this purpose 20 ml of the prepared foam-forming solution was poured into a measuring cylinder, after which air was blown through it for 3 min at a flow rate of 50, 100, 150, 200 ml/min. The dependence of the settling time of half of the foam column on the complex $\frac{\mu r_0}{g\rho}$, which is described by the steppe function $\tau^{1/2} = 2,355 6(\mu r_0 / (g\rho))^{-0,211}$ with an approximation reliability of 95 %, was found. It is concluded that the provision of acceptable foam stability is possible for values of the complex $\frac{\mu r_0}{g\rho}$ not more than $10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}$.

Keywords: stability, foam, foam settling time, stability, foam settling velocity.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

TUMANOV Grigory Alekseevich – Postgraduate Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: xt-337@mail.ru

STAROVOITOV Anatoly Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: avstarovoytov7@yandex.ru

LAGUSEVA Elena Ivanovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: lagusseva@yandex.ru

CHALOV Kirill Vyacheslavovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: tschalov_k@mail.ru

STAROVOITOVA Natalya Yuryevna – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: starovoytovanu@gmail.com

DOLUDA Valentin Yuryevich – Doctor of Chemical Sciences, Head of Department of Chemistry and Polymer Technology, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: doludav@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Tumanov G.A., Starovoitov A.V., Laguseva E.I., Chalov K.V., Starovoitova N.Yu., Doluda V.Yu. Experimental study of foam stability // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2024. No. 3 (23), pp. 95–100.

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

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

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

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

Главный редактор

Гультияев В.И. – д.т.н., доцент ТвГТУ

Ответственный секретарь

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

Члены редакционной коллегии:

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

Белов В.В. – д.т.н., профессор ТвГТУ

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

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

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

Ковалев К.Л. – д.т.н., профессор МАИ

Колесников А.С. – к.т.н., профессор Южно-Казахстанского университета
им. М. Ауэзова, г. Чимкент, Республика Казахстан

Корнеев К.Б. – к.т.н., доцент ТвГТУ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Трещев А.А. – д.т.н., профессор ТулГУ

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

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

Федюк Р.С. – д.т.н., доцент Дальневосточного федерального университета

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

**ВЕСТНИК ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»

Научный рецензируемый журнал
№ 3 (23), 2024

Редактор С.В. Борисов
Корректор С.В. Зорикова

Дата выхода в свет 13.12.2024

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