

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

**ИННОВАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ
И СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

*Материалы VI Всероссийской
научно-практической конференции
(21 июня 2023 г., Тверь)*

Тверь 2023

УДК 378.1:[33+31+62+69+004+502+54]
ББК 74.48

Инновации и моделирование в строительном материаловедении и строительстве: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции (21 июня 2023 г., Тверь) / под ред. В.В. Белова. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2023. 128 с.

Труды, включенные в сборник, посвящены возможностям математического моделирования, прогнозирования свойств и проведения автоматизированных расчетов, определяющим современные инновационные подходы и методологию развития строительных технологий и процессов подготовки специалистов, работающих в данной сфере.

Предназначены для научных и инженерно-технических работников, научно-исследовательских, проектных и производственных организаций, а также докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов вузов строительного профиля.

Авторы статей несут ответственность за достоверность приведенных в них сведений.

ВЛИЯНИЕ ЗОЛЫ-УНОСА НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ БЕТОНА ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

О.В. Александрова, Б.И. Булгаков, Н.Д.В. Куанг

© Александрова О.В., Булгаков Б.И.,
Куанг Н.Д.В., 2023

Аннотация. В статье приведены результаты исследований, посвященных изучению влияния золы-уноса на стойкость бетона к сульфатной коррозии. Указано, что в состав бетона включали золу-унос в качестве частичной замены сульфатостойкого портландцемента. Сделан вывод о том, что использование золы-уноса приводит к уплотнению структуры цементного камня, что потенциально снижает проницаемость бетона и, в частности, уменьшает проникновение внешних сульфат-ионов в матрицу.

Ключевые слова: зола-унос, сульфатная коррозия, бетон, подземное строительство, структура, цементный камень.

Одним из видов бетонных смесей, к которым предъявляются особые требования, являются смеси для производства конструкций подземных сооружений. Такие конструкции эксплуатируются в особо сложных условиях повышенной влажности и испытывают значительно бóльшую нагрузку по сравнению с конструкциями наземных зданий и сооружений. Поэтому специальные нормативы, применяемые к бетонам для подземных сооружений, намного более требовательны к качеству и характеристикам сырьевых материалов. Условия, в которых эксплуатируется материал, предполагают не только его повышенную прочность, но и вытекающие из необходимой стойкости к выщелачиванию и сульфатной коррозии долговечность и водонепроницаемость конструкций. К одним из лучших материалов для подземного строительства относится гидротехнический бетон, высокие эксплуатационные свойства которого обеспечиваются как за счет использования водоредуцирующих суперпластификаторов, так и благодаря применению минеральных добавок и наполнителей.

В настоящее время железобетонные конструкции подвергаются воздействию содержащихся в окружающей среде химических коррозионно-активных агентов, в основном хлорид- и сульфат-ионов. С целью увеличения срока службы таких изделий исследователи в течение ряда лет разрабатывали способы, при помощи которых можно избежать проникновения этих агентов внутрь конструкций. Многие из них сосредоточили

свои усилия на разработке менее проницаемого бетона с низким водоцементным отношением. В связи с этим замена части цемента минеральными добавками, более тонкодисперсными, чем цемент, позволяет получить бетон более плотной структуры. В качестве минеральных добавок использовались зола-унос, микрокремнезем, нановяжущий [1] доменный шлак, гранулированный в тонкоизмельченном виде, метакаолин, зола рисовой шелухи [2], обладающие определенными характеристиками, благодаря которым они по-разному влияют на свойства бетона [3, 4]. Большую роль в производстве бетона с очень низким водоцементным соотношением играют водоредуцирующие химические добавки в виде суперпластификаторов. Это не только повышает прочность, плотность внутренней структуры и химическую коррозионную стойкость получаемого бетона, но и соответствует современным экономическим и экологическим требованиям, так как решается проблема утилизации большого количества промышленных многотоннажных отходов [5, 6], которые наносят вред окружающей среде.

Целью настоящего исследования являлось изучение влияния золы-уноса, используемой в качестве замены части цемента, на коррозионную стойкость бетона.

В работах [7, 8] установлено, что зола-унос может оказывать благотворное воздействие на свойства как бетонной смеси, так и бетона, а именно повышается коррозионная стойкость цементного камня, а также устойчивость бетона к проникновению хлорид-ионов, сульфато-, морозостойкость.

В литературе показано, что, помимо различий в содержании кальция, доля оксидов в золе-уноса, включая кремнезем, глинозем и оксиды железа в дополнение к кальцию, а также их аморфная и кристаллическая фазы могут значительно влиять на эффективность золы-уноса с целью снижения сульфатной коррозии. Для прогнозирования сульфатостойкости бетона, содержащего золу-унос, разработано несколько методов. Одним из них является R-фактор, учитывающий процентное содержание в сырье CaO и Fe₂O₃ [9]:

$$R = \frac{\text{CaO} - 5}{\text{Fe}_2\text{O}_3}.$$

Согласно приведенной в публикации [9] классификации золы-уноса с величиной R-фактора выше 3; 1,5–3; 0,75–1,5 и ниже 0,75, изменение устойчивости к сульфатам характеризуется следующим образом: приводит к снижению сульфатостойкости, не вызывает никаких существенных ее изменений, умеренно улучшает сульфатостойкость бетона, значительно улучшает сульфатостойкость соответственно.

Значение R-фактора для использованной золы-уноса составило 0,73, что соответствует значительному улучшению сульфатостойкости бетона. На рис. 1 отражена зависимость между величиной R-фактора и коэффициентом расширения содержащего золу-унос бетона в результате сульфатной коррозии [10].

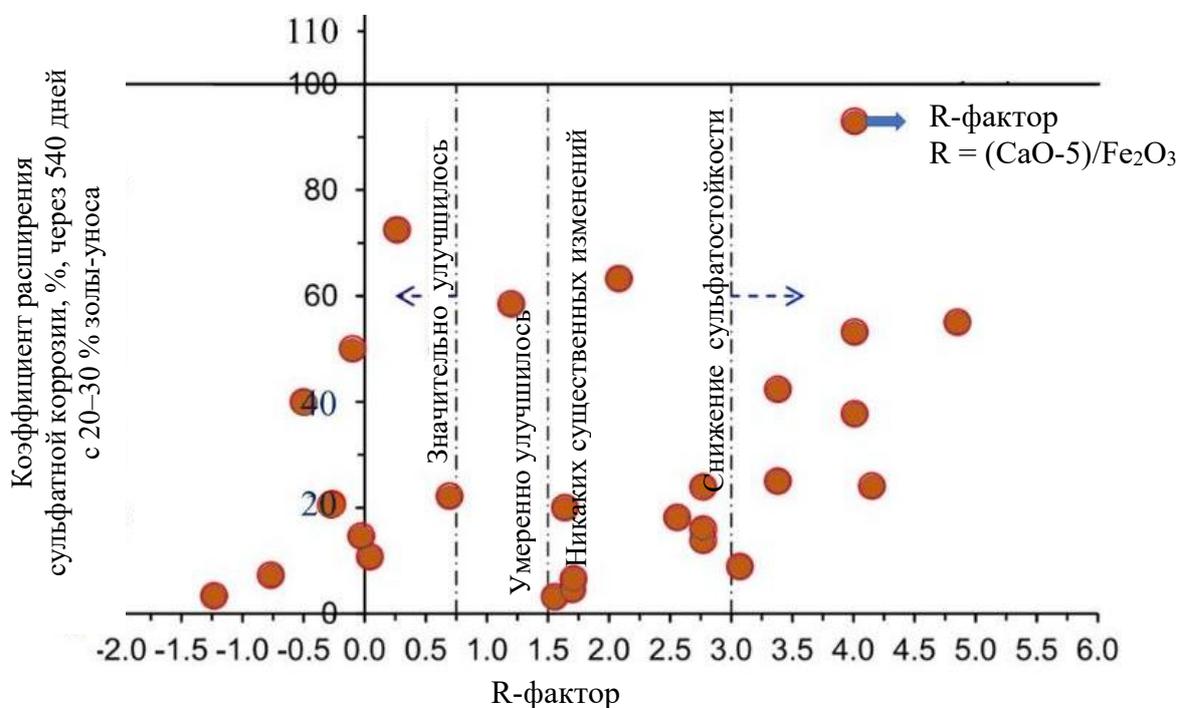


Рис. 1. Взаимосвязь между R-фактором и коэффициентом расширения бетона, содержащего 20–30 % золы-уноса и подвергнутого воздействию раствора Na_2SO_4

Изучение влияние золы-уноса на стойкость бетонов к воздействию сульфатов проводились на трех видах бетонных образцов, составы которых приведены ниже:

Номер состава	Портланд-цемент сульфатостойкий	Зола-унос		Вода	Суперпластифицирующая добавка	Водовяжущее отношение
	кг	%	кг	л	л	—
1	550	—	—	156	9,9	0,3
2	440	20	110			
3	385	30	165			

На рис. 2 даны рентгенограммы образцов цементного камня П, выдержанных в воде и 10%-м по массе растворе Na_2SO_4 в течение 540 дней.

Рентгенограммы всех образцов, выдержанных в воде, показывают снижение интенсивности пика $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с увеличением количества золы-уноса ЗУ, что связано с пуццолановой реакцией. В растворе сульфата натрия в контрольном образце № 1 наблюдались пики как этtringита Э, так и гипса Г (рис. 2а), что указывает на проникновение сульфат-ионов в матрицу и их взаимодействие с продуктами гидратации с образованием этtringита и гипса. По сравнению с образцом № 1 пик гипса в образце № 2 снизился (рис. 2б). Однако этtringит все еще остается основным продуктом коррозии, поскольку интенсивность его пика снизилась незначительно. С увеличением количества золы-уноса до 30 % пик этtringита продолжил снижаться и в образце № 3 уже не был обнаружен, при этом интенсивность пика $\text{Ca}(\text{OH})_2$ также уменьшилась (рис. 2в).

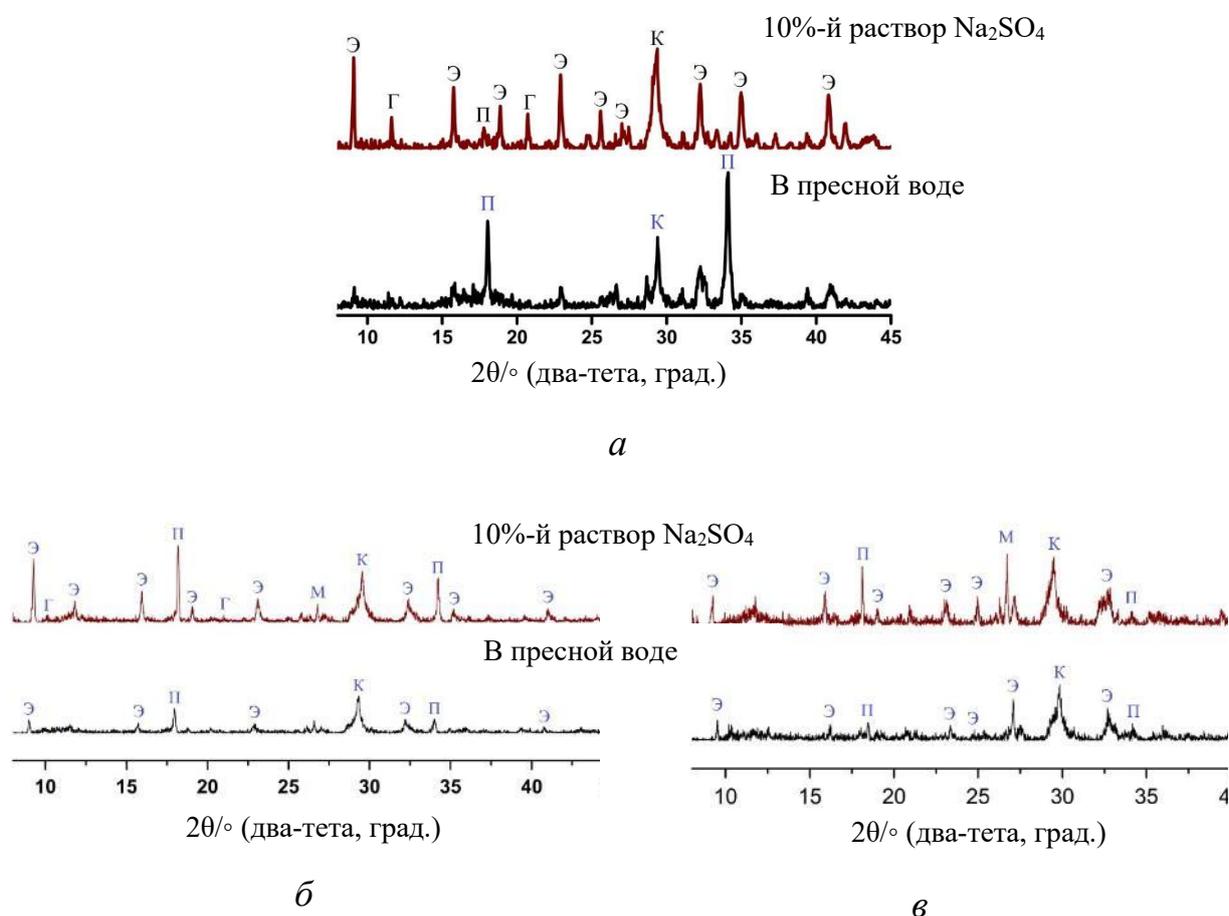


Рис. 2. Рентгенограммы образцов цементного камня после экспонирования в воде и 10%-м растворе Na_2SO_4 в течение 540 дней: а – состав № 1 (100 % сульфатостойкого П); б – состав № 2 (80 % П + 20 % ЗУ); в – состав № 1 (70 % П + 30 % ЗУ)

Изображения, полученные путем сканирующей электронной микроскопии, показывают микроструктуру образцов ЗУ2.5, ЗУ2.6 и ЗУ2.7, подвергавшихся воздействию 10%-го раствора Na_2SO_4 в течение 540 дней (рис. 3). Добавление 20 и 30 % золы-уноса снизило содержание CaO

соответственно на 16,7 и 21,1 % в результате пуццолановой реакции, которая уменьшила образование продуктов сульфатной коррозии. Как видно из рис. 3, в контрольном образце бетона № 1 (100%-й цемент) образовалось значительное количество гипса, в то время как этого не наблюдалось при добавлении золы-уноса в количестве 20 и 30 % (образцы № 2 и 3 соответственно).

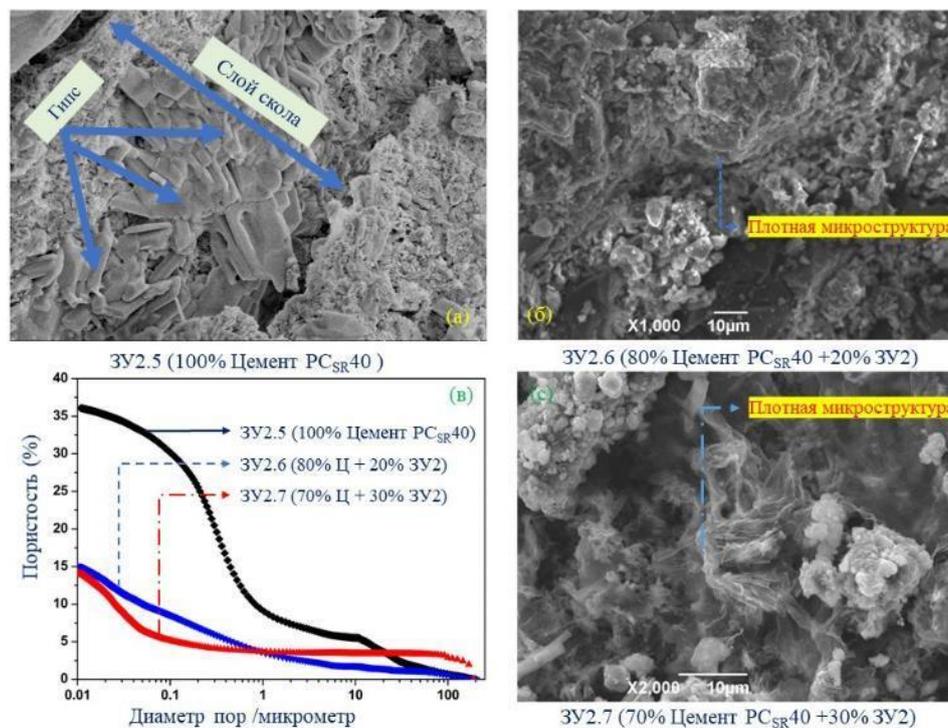


Рис. 3. Изменения микроструктуры и пористости бетонных образцов при добавлении золы-уноса

Замена сульфатостойкого портландцемента в составе вяжущего многотоннажными промышленными отходами, образующимися на множестве угольных тепловых электростанций, будет способствовать защите окружающей среды благодаря сокращению площадей свалок, отводимых для захоронения техногенных отходов, а уменьшению выбросов углекислого газа при производстве цемента.

Кроме того, в силу химико-физических свойств золы-уноса ее использование приводит к снижению количества воды в бетонной смеси за счет низкого водовязущего отношения, что в свою очередь повышает свойства и эксплуатационные показатели получаемой продукции.

Добавление золы-уноса обеспечивает и улучшение структуры пор наряду с уменьшением общей пористости цементного камня (см. рис. 3), что потенциально также способствует минимизации проницаемости бетона, а значит, матрица будет в большей степени защищена от проникновения в нее внешних сульфат-ионов.

Библиографический список

1. Технологичные подходы направленного структурообразования нанокompозитов строительного назначения с повышенной коррозионной устойчивостью / Д.А. Синицин, Р.М. Халиков, Б.Г. Булатов, К.С. Галицков, И.В. Недосеко // Нанотехнологии в строительстве. 2019. Т. 11. № 2. С. 153–164.
2. Структура и свойства известково-золяного цемента и его модификация / А.Н. Рязанов, В.И. Винниченко, И.В. Недосеко, В.А. Рязанова, А.А. Рязанов // Строительные материалы. 2018. № 1-2. С. 18–22.
3. Jayant D.V. Mineral Admixtures in Cement and Concrete. CRC Press, 2012. 310 p. URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/b12673/mineral-admixtures-cement-concrete-jayant-barat> (дата обращения: 14.04.2023).
4. Rafat S., Mohammad I.K. Supplementary Cementing Materials. Berlin – Heidelberg: Springer, 2019. 304 p. URL: <https://books.google.ru/books?id=yQgVhzeAMUEC&printsec=frontcover&hl=ru#v=onepage&q&f=false> (дата обращения: 14.04.2023).
5. Combined effect on properties and durability performance of nanomodified basalt fiber blended with bottom ash-based cement concrete: ANOVA evaluation / R. Fediuk, N. Makarova, D.N Qader, A. Kozin, M. Amran, V. Petropavlovskaya, T. Novichenkova, M.G. Sulman, K. Petro-pavlovskii // Journal of Materials Research and Technology. 2023. № 11. P. 2642–2657. URL: https://www.researchgate.net/publication/368222795_Combined_effect_on_properties_and_durability_performance_of_nanomodified_basalt_fiber_blended_with_bottom_ash-based_cement_concrete_ANOVA_evaluation (дата обращения: 14.04.2023).
6. Coal Ash Enrichment with Its Full Use in Various Areas / V. Petropavlovskaya, T. Novichenkova, M. Sulman, K. Petropavlovskii, R. Fediuk, M. Amran // Materialsthis link is disabled. 2022. № 15 (19). 6610 p.
7. Theoretical and Experimental Models to Evaluate the Possibility of Corrosion Resistant Concrete for Coastal Offshore Structures / S. Fedosov, B. Bulgakov, H.X. Ngo, O. Aleksandrova, V. Solovev // Materialsthis link is disabled. 2022. № 15 (13). 4697 p. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/13/4697> (дата обращения: 24.04.2023).
8. The Effect of Mineral Admixtures and Fine Aggregates on the Characteristics of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete / O.V. Aleksandrova, N.D.V. Quang, B.I. Bulgakov, S.V. Fedosov, N.A. Lukyanova, V.B. Petropavlovskaya // Materialsthis link is disabled. 2022. № 15 (24). 8851 p.
9. Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability performance of mortar mixtures view point / A.M. Aghabaglou, A. Mardani-Aghabaglou, G. Inan Sezer, K. Ramyar // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 70. P. 17–25.

10. Improving the sulfate attack resistance of concrete by using supplementary cementitious materials (SCMs): A review / M.M.A. Elahi, C.R. Shearer, A. Naser, A.N.R. Reza, A. Saha, Md.N.N. Khan, M.M. Hossain, P.K. Sarker // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 281 (2). URL: https://www.researchgate.net/publication/349519162_Improving_the_sulfate_attack_resistance_of_concrete_by_using_supplementary_cementitious_materials_SCMs_A_review (дата обращения: 14.04.2023).

INFLUENCE OF FLY ASH ON THE CORROSION RESISTANCE OF CONCRETE FOR UNDERGROUND CONSTRUCTION

O.V. Aleksandrova, B.I. Bulgakov, N.D.V. Quang

***Abstract.** The article presents the results of studies devoted to the study of the effect of fly ash on the resistance of concrete to sulfate corrosion. It is indicated that fly ash was included in the composition of concrete as a partial replacement for sulfate-resistant Portland cement. It is concluded that the use of fly ash leads to compaction of the cement stone structure, which potentially reduces the permeability of concrete and, in particular, reduces the penetration of external sulfate ions into the matrix.*

***Keywords:** fly ash, sulfate corrosion, concrete, underground construction, structure, cement stone.*

Об авторах:

АЛЕКСАНДРОВА Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: aleks_olvl@mail.ru

БУЛГАКОВ Борис Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: fakultetst@mail.ru

НГУЕН ДЫК ВИНЬ КУАНГ – кандидат технических наук, Индустриальный колледж Хюэ, Вьетнам. E-mail: ndvquang@hueic.edu.vn

About the authors:

ALEKSANDROVA Olga Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials Science, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. E-mail: aleks_olvl@mail.ru

BULGAKOV Boris Igorevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Materials Science, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. E-mail: fakultetst@mail.ru

NGUYEN DUC VINH QUANG – Candidate of Technical Sciences, Hue Industrial College, Vietnam. E-mail: ndvquang@hueic.edu.vn

УДК 691.328.34:004.925.83

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИФИКАТОРА НА СВОЙСТВА ГИПСОЗОЛОПЕРЛИТОВОГО КАМНЯ

**М.И. Аль-Свейти, В.Б. Петропавловская, К.С. Петропавловский,
Т.Б. Новиченкова, А.Ф. Бурьянов**

**© Аль-Свейти М.И., Петропавловская В.Б.,
Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б.,
Бурьянов А.Ф., 2023**

***Аннотация.** В статье анализируется влияние пластификатора на физико-механические и структурные характеристики золотипсового композита с добавкой вспученного перлита. Исследования проводились с использованием спланированного эксперимента. Изучены данные испытаний физико-механических свойств образцов гипсо-золо-перлитового композита. По результатам исследования установлены оптимальные рецептурные составы композита, рекомендуемого для изготовления стеновых теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционным стеновых материалов с повышенными эксплуатационными свойствами.*

***Ключевые слова:** гипс, перлит, суперпластификатор, структура, физико-механические свойства.*

Перлит играет важную роль в строительстве. Его смешивают с цементом, битумом, известью, гипсом или другими вяжущими для получения бетона или раствора с заданными свойствами. Как правило, заполнители обеспечивают стабильность объема, устойчивость к износу или эрозии и другие желаемые физические свойства готовых изделий. Различают два вида легких заполнителей: натуральные и искусственные.

В связи с быстрым сокращением энергоресурсов ведутся интенсивные работы в области альтернативных методов производства энергии. В этом контексте теплоизоляция занимает важное место с точки зрения энергосбережения. Потери энергии могут быть сведены к минимуму при использовании изоляционных технологий. Здания и населенные пункты ответственны за 40 % попадающего в атмосферу CO₂, который является

основной причиной глобального потепления. Отсюда следует, что для уменьшения количества энергии, необходимой для обогрева зданий, применяются различные изоляционные системы и материалы [1, 2].

В последние годы разрабатываются новые экологически чистые гипсовые материалы с перлитом. Широкое распространение получает применение легких природных заполнителей в различных отраслях промышленности. Кроме того, установлено, что добавка вспученного перлитазаполнителя положительно влияет на свойства газобетона. Перлит – природный строительный материал, использование которого в строительстве в качестве заполнителя бетона имеет свои экономические и экологические преимущества [3, 4].

Легкие гипсы широко применяются в строительных конструкциях с целью обеспечения тепло- и звукоизоляционных свойств. В качестве исходного сырья для получения таких растворов могут использоваться природные пористые и легкие заполнители, такие как пемза, вулканический пепел, вспученные перлит и вермикулит, шлак и туф.

Перлит относят к алюмосиликатным породам вулканического происхождения. При нагревании он расширяется и приобретает форму ячеистого материала с малой плотностью [5]. Вспученный перлит обладает отличными тепло- и звукоизоляционными свойствами благодаря своей легкой и пористой структуре [6]. По этой причине композит на основе перлита в последнее время становится одним из самых популярных минеральных наполнителей [7, 8].

Перлит представляет собой природное гидратированное вулканическое стекло риолитового состава [9], которое может быть переработано в расширенную форму для образования ячеистой структуры [10, 11]. Расширение происходит при нагревании перлита примерно до 649–816 °С за счет присутствия в нем воды [4]. Вспученный перлит имеет высокий потенциал для применения в качестве строительного материала, поскольку он характеризуется хорошими акустическими [12] и теплоизоляционными свойствами [13], легкостью и доступен по цене. Кроме того, перлит безвреден для окружающей среды, поскольку не вступает в реакцию с грунтовыми водами и не выщелачивается в них [14], а следовательно, является идеальным заполнителем для сэндвич-композитов. В строительной отрасли стоимость материалов обуславливает выбор материалов, поскольку требуется большое их количество. Масса материала – важный технико-экономическим фактор [15–18]. Делались попытки уменьшить плотность материала путем увеличения пористости гипса, но они не увенчались значительным успехом [15].

В качестве основного компонента в исследованиях применялось вяжущее одного из крупнейших предприятий гипсовой отрасли России – гипс марки Г-16 α -модификации, который в соответствии с ГОСТ 125-2018 имел характеристики:

предел прочности при сжатии 16 МПа;
 предел прочности при изгибе 6 МПа;
 начало схватывания не ранее 4,5 мин;
 конец схватывания не позднее 20 мин;
 остаток на сите 0,2 мм не более 1 %.

В работе дополнительно использовались пористые наполнители – добавки углеродного концентрата и вспученного перлита (рис. 1), который измельчали и просеивали через сито 1,25 мм.

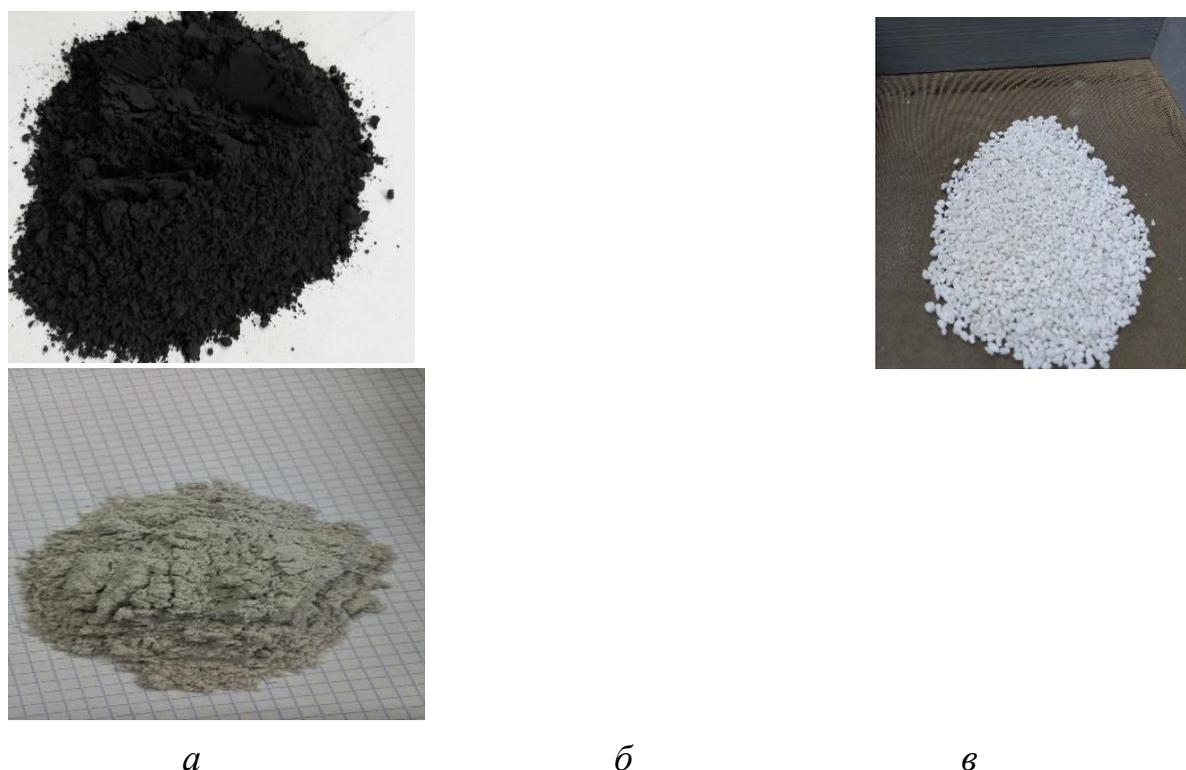


Рис. 1. Внешний вид добавок: *a* – углеродный концентрат; *б* – перлит непросеянный; *в* – перлит просеянный

Характеристики наполнителей:

1. Химический состав углеродного концентрата, мас. %:

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	CO ₂	MnO
68,9	18,67	6,5	1,61	1,52	1,33	0,53	0,26	0,1	–

2. Плотность углеродного концентрата, кг/м³:

Истинная	2 120
----------	-------

Насыпная	642–747
----------	---------

3. Химический состав перлита, мас. %:

SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃	CaO
72	12	4,1	3,4	0,2	2,5	3

4. Физические свойства перлита:

Цвет	Показатель преломления	pH	Влажность	Плотность	Насыпная плотность
Белый	1,5	6,5–8,0	0,5 %	2 200– 2 400 кг/м ³	960– 1 200 кг/м ³
Насыпная плотность вспученного перлита	Диаметр	Температура размягчения	Температура плавления	Удельная теплоемкость	Теплопроводность
60–160 кг/м ³	0–2,5 мм	871– 1 093 °C	1 260– 1 343 °C	837 Дж/кг·°C	0,045– 0,065 Вт/м·°C

Варьируемыми факторами в данном эксперименте были назначены процентное содержание перлита X1 и содержание суперпластификатора X2, при постоянном содержании углеродного концентрата (табл. 1).

Таблица 1

Матрица варьирования факторов

Номер опыта	Матрица		Содержание перлита, %	Содержание пластификатора, %
	X1	X2		
1	–	–	45	0
2	+	–	45	0,2
3	–	+	75	0
4	+	+	75	0,2
5	–	0	60	0
6	+	0	60	0,2
7	0	–	45	0,1
8	0	+	75	0,1
9	0	0	60	0,1

Кубики размером 2x2x2 см были изготовлены в лаборатории Тверс-

кого государственного технического университета (рис. 2). Образцы были протестированы через 3 сут. Результаты исследований физико-механических свойств представлены в табл. 2.



Рис. 2. Образцы гипсового композита до испытаний

Таблица 2

Данные по испытаниям свойств гипсового композита

Номер опыта	Гипс	Углеродный концентрат	В/Т	Прочность при сжатии, МПа	Плотность кг/м ³	Удельная прочность, МПа
1	300	0	0,4	33	1 510	22
2	210	63	0,52	11	1 149	9,6

Полученные экспериментальные данные по исследованию гипсового композита с добавкой перлита приведены в табл. 3.

Таблица 3

Предел прочности при сжатии, средняя плотность гипсового композита и водопотребность сырьевой смеси

Номер опыта	Прочность при сжатии, МПа	Удельная прочность, МПа	Средняя плотность, кг/м ³	В/Т
1	16,4	13,9	1 178,7	0,51
2	16,4	12,6	1 298	0,42
3	13,7	12,2	1 119,7	0,55
4	14,3	11,5	1 241	0,434
5	11,2	9,8	1 147	0,533

6	15,9	12,2	1 306,3	0,443
7	18,6	14,9	1 251	0,46
8	18	14,8	1 216,7	0,483
9	16	12,8	1 248,7	0,467

После обработки результатов были получены уравнения регрессии для гипсового камня с добавкой микрогранул по прочности, плотности, водопотребности и удельной прочности.

Результаты исследования влияния перлита и суперпластификатора на свойства гипсового композита приведены на рис. 3–6.

На рис. 3 представлена зависимость прочности от содержания перлита и пластификатора (DKG). Показано, что при содержании 60 % перлита прочность композита снизилась на 23 % по сравнению с контрольным составом. При увеличении содержания перлита в диапазоне 65–75 % прочность монотонно возрастала.

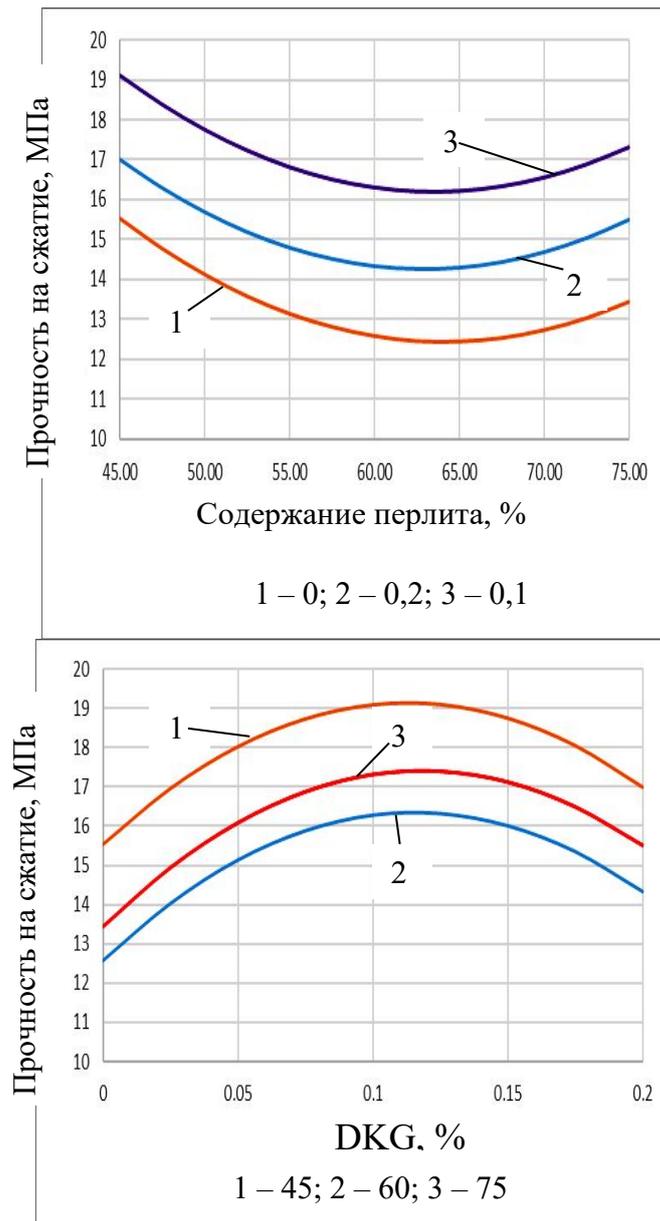


Рис. 3. Зависимость прочности модифицированного гипсового камня от содержания добавки перлита и пластификатора (DKG)

На рис. 4 представлена зависимость средней плотности золо-гипсо-перлитового камня от содержания перлита при разных концентрациях вводимого пластификатора. Установлено, что плотность полученного композита с добавкой перлита в исследованном диапазоне уменьшается на 30 %.

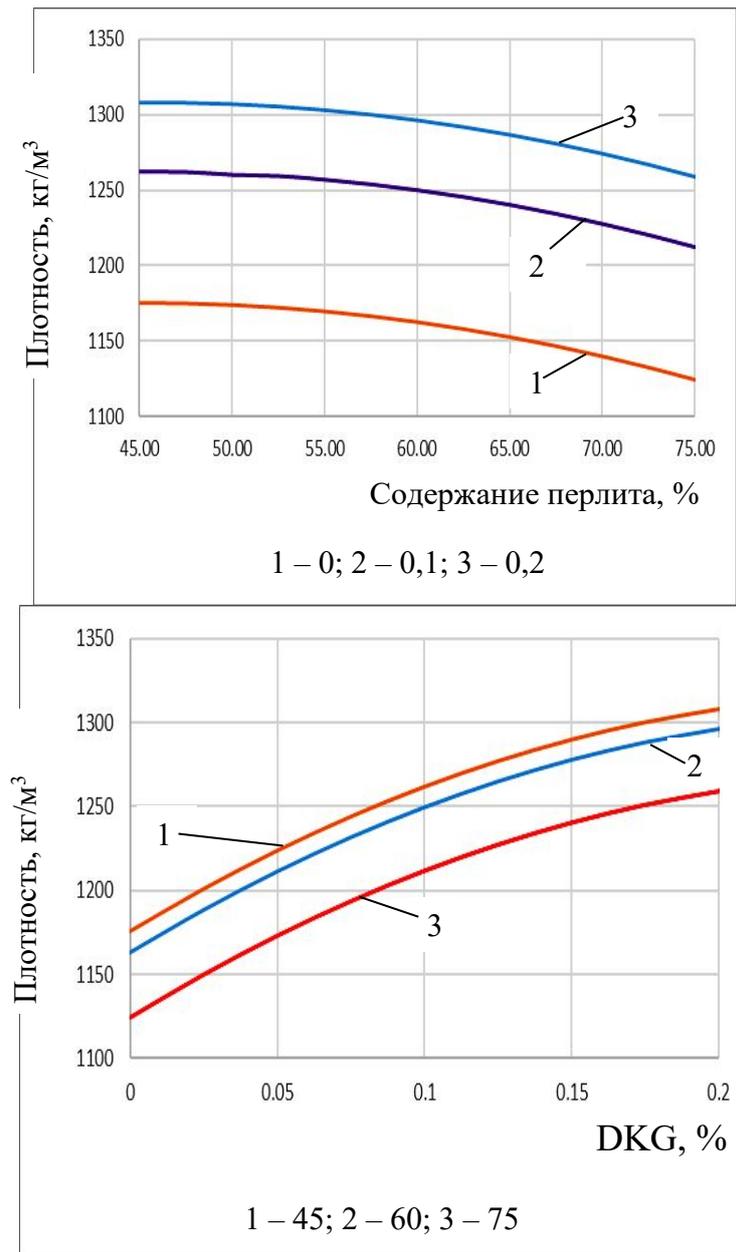


Рис. 4. Зависимость плотности модифицированного гипсового камня от содержания добавки перлита и пластификатора (DKG)

На рис. 5 показаны соотношения между водопотребностью и количественным содержанием наполнителей. На графиках видно, что содержание воды в смеси увеличивается на 19 % в диапазоне изменения содержания добавки перлита 45–75 %.

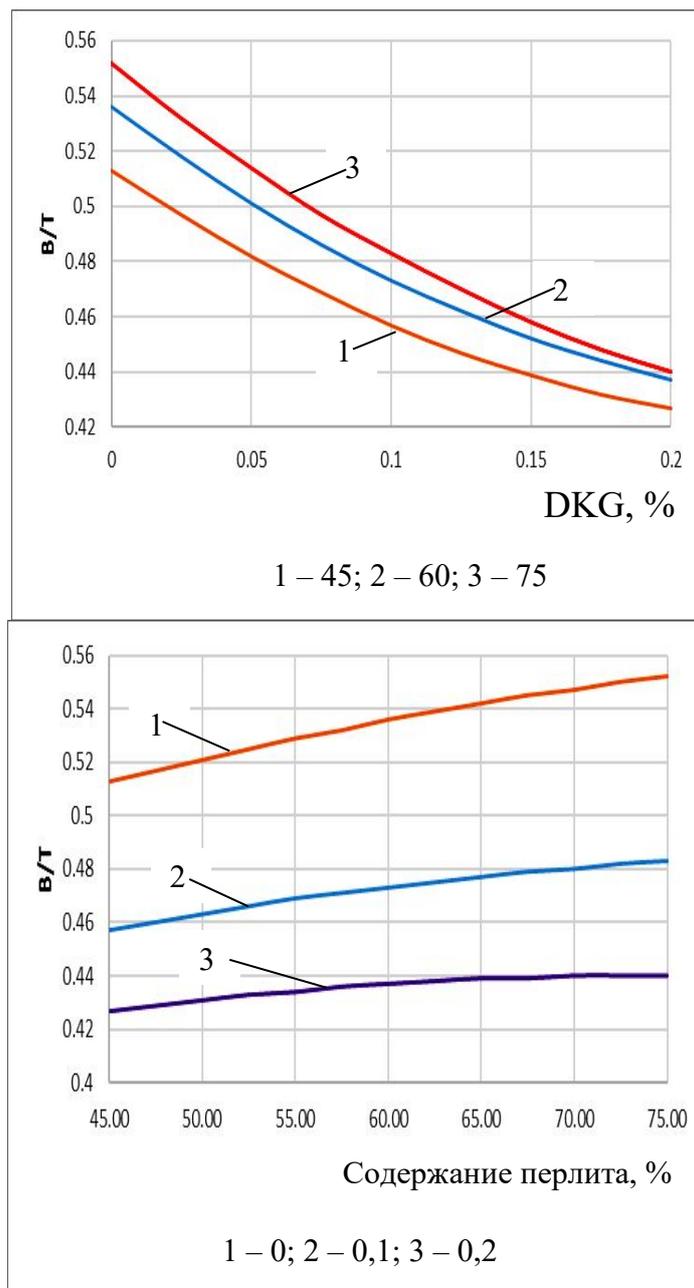


Рис. 5. Зависимость водопотребности модифицированного гипсового камня от содержания добавки перлита при различных концентрациях пластификатора

На графиках рис. 6 отражена зависимость удельной прочности композита, рассчитанной на основе данных регрессионного анализа, от содержания добавок перлита и пластификатора. Удельная прочность определяется как отношение прочности композита к его средней плотности. Наиболее высокие показатели достигнуты для состава смеси с содержанием перлита в количестве 60 %.

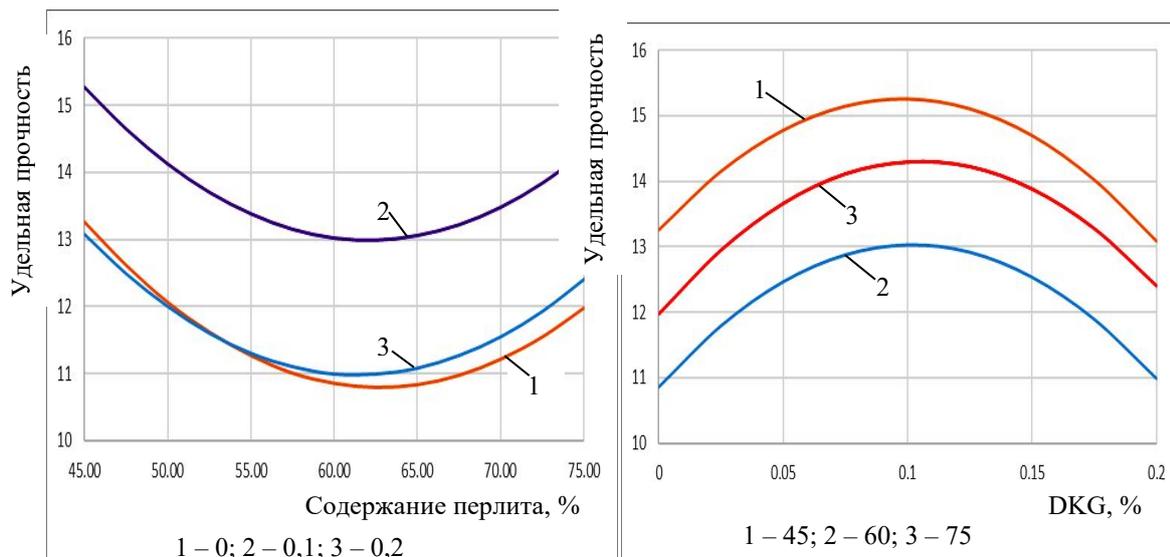


Рис. 6. Зависимость удельной прочности модифицированного гипсового камня от содержания добавки перлита при различных концентрациях пластификатора

Таким образом, результаты эксперимента показывают, что существует синергетический эффект применения перлита и углеродного компонента золошлаковых отходов топливной промышленности, образующихся при гидроудалении на теплоэлектростанциях. По-видимому, достигаемый эффект объясняется получением оптимального зернового состава композита, что согласуется с данными статьи [19], но для более точных и достоверных выводов требуются проведение дополнительного исследования и его оценка.

В целом на основании проведенных исследований можно утверждать:

1. У образцов, полученных на основе перлита, прочность на сжатие увеличилась на 36 %.
2. Добавление в гипсовую смесь пластификатора позволило повысить прочность на сжатие до 57 %.
3. После добавления золы наблюдалось снижение плотности на 24 %.
5. Добавление углерода в гипсовый состав привело к увеличению водопотребности на 30 %.
6. Углерод увеличивает водопотребность смеси, но при введении добавки перлита этот показатель понизился до 19 %.

Введение добавки перлита способствовало повышению прочности на сжатие без уменьшения общей пористости. По результатам исследования были определены оптимальные рецептурные составы композита, рекомендуемого для изготовления стеновых теплоизоляционных и конструктивно-теплоизоляционных стеновых материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Библиографический список

1. Binici H., Aksogan O., Demirhan C. Mechanical, thermal and acoustical characterizations of an insulation composite made of bio-based materials // *Sustainable Cities and Society*. 2016. № 20. P. 17–26.
2. Topcu I.B. Properties of heavyweight mortar produced with barite // *Cement and Concrete Research*. 2003. № 33. P. 815–822.
3. Radiation transmission of heavyweight and normal-weight mortars containing colemanite for 6 MV and 18 MV X-rays using linear accelerator / F. Demir, G. Budak, R. Sahin, A. Karabulut, M. Oltulu, K. Serifoglu // *Annals of Nuclear Energy*. 2010. № 37. P. 339–344.
4. Aksogan O., Binici H., Ortlek E. Durability of concrete made by partial replacement of fine aggregate by colemanite and barite and cement by ashes of corn stalk, wheat straw and sunflower stalk ashes // *Construction and Building Materials*. 2016. № 106. P. 253–263.
5. Różycka A., Pichór W. Effect of perlite waste addition on the properties of autoclaved aerated concrete // *Construction and Building Materials*. 2006. № 120. P. 65–71.
6. Preparation of fine expanded perlite / K. Sodeyama, Y. Sakka, Y. Kamino, H. Sekki // *Journal of Materials Science*. 1999. № 34. P. 2461–2468.
7. Sun D., Wang L. Utilization of paraffin/expanded perlite materials to improve mechanical and thermal properties of cement mortar // *Construction and Building Materials*. 2015. № 101. P. 791–796.
8. Jedidi M., Benjeddou O., Soussi Ch. Effect of Expanded Perlite Aggregate Dosage on Properties of Lightweight Concrete // *Jordan Journal of Civil Engineering*. 2015. № 9. P. 278–291.
9. *Igneous Rocks: a Classification and Glossary of Terms* / R.W. Le Maitre, A. Streckeisen, B. Zanettin, B.M. Le Bas, B. Bonin, P. Bateman. New York: Cambridge University Press, 2002. 252 p.
10. Singh M., Garg M. Perlite-based building materials – a review of current applications // *Construction and Building Materials*. 1991. № 5. P. 75–81.
11. Physico-chemical characterization of perlite of various origins / N. Burriesci, A. Arcoraci, P. Antonucci, G. Polizotti // *MATEC Web of Conferences*. 1985. № 3. P. 103–110.
12. Johnstone S.J., Johnstone M.G., Sydney J. *Minerals for the chemical and allied industries*. 2nd ed. London: Chapman and Hall, 1961. 800 p.
13. Yilmazer S., Ozdeniz M.B. The Effect of Moisture Content on Sound Absorption of Expanded Perlite Plates // *Building and Environment*. 2005. № 40. P. 311–318. URL: https://www.researchgate.net/publication/229389609_The_Effect_of_Moisture_Content_on_Sound_Absorption_of_Expanded_Perlite_Plates (дата обращения: 28.03.2023).

14. Dube W.P., Sparks L.L., Slifka A.J. Thermal conductivity of evacuated perlite at low temperatures as a function of load and load history // Cryogenics. 1991. № 31. P. 3–6.

15. Strengthened lightweight wallboard and method and apparatus for making the same: pat. 6251979B1 United States / Luongo J.S. URL: <https://patents.google.com/patent/US6251979B1/en> (дата обращения: 28.03.2023).

16. Colak A. Density and strength characteristics of foamed gypsum // Cement and Concrete Composites. 2000. № 22. P. 193–200.

17. Петропавловская В.Б. Использование минеральных ультрадисперсных модификаторов на основе отходов промышленности в гипсовых композитах // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 18–23.

18. Role of basalt dust in the formation of the modified gypsum structure / V. Petropavlovskaya [et al.] // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 97. P. 02036.

19. Использование отходов природного гипсового камня в производстве безобжиговых материалов / В.Б. Петропавловская [и др.] // Строительные материалы. 2012. № 7. С. 28–31.

STUDY OF THE EFFECT OF PLASTICIZER AND WATER DEMAND ON THE PROPERTIES OF GYPSUM-ASH-PERLITE STONE

M.I. Al-Sweite, V.B. Petropavlovskaya, K.S. Petropavlovskii,
T.B. Novichenkova, A.F. Buryanov

***Abstract.** The article analyzes the effect of the plasticizer on the physico-mechanical and structural characteristics of the ash gypsum composite with the addition of expanded perlite. The research was carried out using a planned experiment. The test data of the physico-mechanical properties of gypsum-perlite composite samples have been studied. According to the results of the study, the optimal formulation compositions of the composite recommended for the manufacture of wall thermal insulation and structural-thermal insulation wall materials with increased performance properties have been established.*

***Keywords:** gypsum, perlite, superplasticizer, structure, physical and mechanical properties.*

Об авторах:

АЛЬ-СВЕЙТИ Моханнад Июсиф – аспирант кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: mohadsweity@gmail.com

ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ Виктория Борисовна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ Кирилл Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры биотехнологии, химии и стандартизации, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

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

БУРЬЯНОВ Александр Федорович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: rga-service@mail.ru

About the authors:

AL-SWEITI Mohannad Yusif – Postgraduate Student of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: mohadsweity@gmail.com

PETROPAVLOVSKAYA Victoria Borisovna – Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

PETROPAVLOVSKII Kirill Sergeevich – Candidate of Technical Sciences, Research Associate of the Department of Biotechnology, Chemistry and Standardization, Tver State Technical University, Tver. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

NOVICHENKOVA Tatiana Borisovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Products and Structures Production, Tver State Technical University, Tver. E-mail: tanovi.69@mail.ru

BURYANOV Alexander Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department of Building Materialsscience, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow. E-mail: rga-service@mail.ru

УДК 624.072.2.014-415

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ

Б.А. Гогаладзе, С.Л. Субботин, Г.С. Тырин, Ю.С. Бондарева

© Гогаладзе Б.А., Субботин С.Л.,
Тырин Г.С., Бондарева Ю.С., 2023

Аннотация. В статье представлен обзор современных тенденций развития легких стальных тонкостенных конструкций, указана область их применения, отмечены достоинства и недостатки. Проанализированы теория тонкостенных стержней В.З. Власова и метод конечных элементов, лежащие в основе расчета таких конструкций. Рассмотрены современные программно-вычислительные комплексы для расчета легких стальных тонкостенных конструкций, методы и возможности их расчета.

Ключевые слова: легкие стальные тонкостенные конструкции, профиль строительный, строительство, теория тонкостенных стержней, расчет, метод конечных элементов, моделирование.

Современные тенденции применения тонкостенных стержневых конструкций

В настоящее время в России пользуются большим спросом легкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) из гнутых металлических профилей и оцинкованной стали. Они широко применяются в промышленном и гражданском строительстве. Важными преимуществами металлических конструкций являются постоянство их размеров и то обстоятельство, что такие конструкции, в отличие от деревянных и железобетонных, не подвержены усадке.

Одним из свойств стали выступает высокая теплопроводность, которая приводит к образованию «мостиков холода», проходящих по всему поперечному сечению стены. Это влечет за собой промерзание внутренней поверхности стены, выпадение конденсата и, что самое главное, происходят большие потери тепла [1], поэтому сталь не используют в конструкциях для наружных стен. Для предотвращения значительных теплопотерь ограждающих конструкций в настоящее время применяют термопрофиль, который представляет собой холоднокатаные П-, Е- и С-образные профили из листовой оцинкованной стали (рис. 1). Так появилось быстровозводимое каркасное строительство – технология ЛСТК.

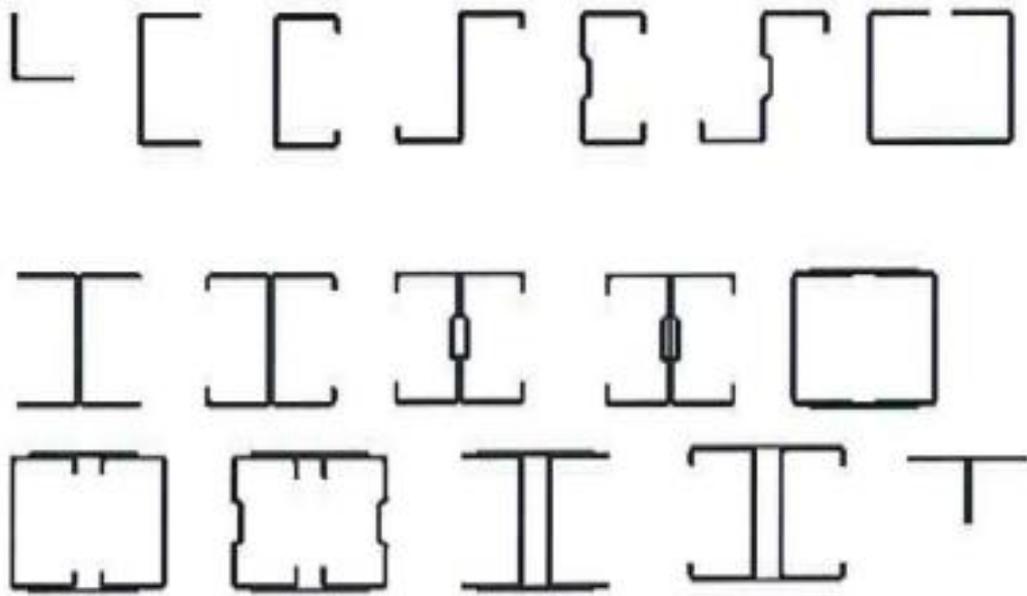


Рис. 1. Типовые формы профилей и сечений конструкций из ЛСТК-профиля [1]

Профили изготавливают из горячеоцинкованной высокопрочной конструкционной листовой стали толщиной от 0,7 до 4 мм с различными размерами сечений. Термопрофиль имеет просечки, расположенные в шахматном порядке, которые увеличивают тепловое сопротивление за счет удлинения пути потери тепла, но сечение теплопроводного материала в конструкции при этом уменьшается (рис. 2).

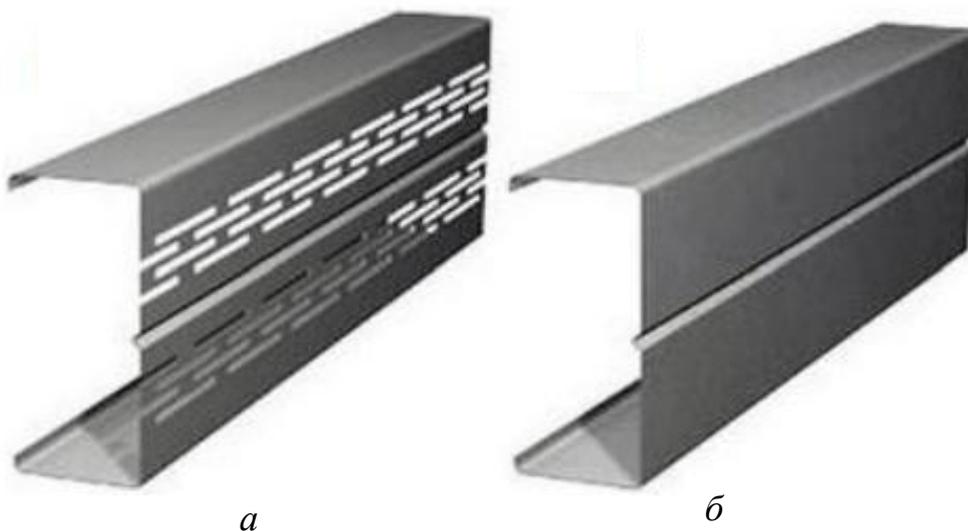


Рис. 2. Термопрофиль: *а* – с просечкой; *б* – без просечки

На данный момент ЛСТК-технология позволяет быстро и эффективно возводить объекты различного назначения: индивидуальные жилые

дома, мансарды, складские сооружения, административные и офисные здания. В комплект входят несущие профили для наружных и внутренних стен, перегородок, стропильных систем, системы водостоков, системы обслуживания кровли, а также стальная обрешетка для кровли и стен в случае применения вентилируемого фасада [2].

Решению теоретических, технических и практических проблем при проектировании и строительстве зданий из ЛСТК посвящены работы Н.И. Ватина, А.С. Синельникова, О.Г. Зинкевича, Т.А. Корнилова и др. [3–5].

Теория тонкостенных стержней В.З. Власова

Важным этапом при проектировании сооружений из стальных тонкостенных конструкций является определение напряженно-деформированного состояния элементов. Сейчас такие задачи решаются при помощи специализированных программных пакетов, основанных на методе конечных элементов. До сих пор расчет тонкостенных стержней в программно-вычислительных комплексах остается на относительно невысоком уровне, при том что исследований, посвященных построению различных матриц жесткости таких элементов, достаточно много (например, [6]).

Основоположителем теории расчета тонкостенных стержней является В.З. Власов [7]. Задача, стоящая перед ученым, заключалась в разработке новой, простой и доступной теории расчета тонкостенных конструкций – одних из наиболее распространенных элементов металлоконструкций.

Работа В.З. Власова содержит общую теорию тонкостенных стержней, которая в настоящее время широко применяется для расчетов конструктивных элементов в строительстве. Согласно этой теории, тонкостенные стержни, имеющие в первоначальном состоянии форму цилиндрической оболочки, рассматриваются как пространственная пластинчатая сплошная система, способная воспринимать не только осевые усилия, но и крутильные моменты. В отношении деформации стержня В.З. Власов вместо привычной гипотезы плоских сечений рассматривает более общую гипотезу о недеформируемости контура поперечного сечения стержня и гипотезу об отсутствии деформаций сдвига в срединной поверхности. Так был сформулирован закон распределения по сечению деформаций, т. е. закон секторальных площадей, позволяющий определить напряжения в стержне в общем случае.

Метод конечных элементов

Существующие способы расчета тонкостенных стержневых систем с помощью метода конечных элементов предполагают использование:

- оболочечных конечных элементов;
- тонкостенных конечных элементов с дополнительно введенной связью;
- бистержневой модели.

При моделировании оболочечных конечных элементов расчетная модель (тонкостенный профиль) разбивается на конечные элементы и узлы, которые обладают шестью степенями свободы. Следовательно, нагрузка для каждого из узлов сводится к шести компонентам. В результате составления общей матрицы жесткости системы и решения глобальной системы дифференциальных уравнений определяются перемещения по шести направлениям для каждого узла, а затем происходит переход к напряжениям внутри конечно-элементных пластин.

Из недостатков данного метода можно отметить трудоемкость построения модели для расчета и большое количество конечных элементов, что значительно затрудняет расчет по сравнению с стержневой моделью.

Современные программно-вычислительные комплексы

В последние десятилетия быстрое развитие программного обеспечения дало возможность создать компьютерные модели довольно сложных изделий и их составных частей. Благодаря новым технологиям в проектировании увеличивается область применения теоретических исследований конструкционных материалов с различными свойствами.

Многие современные программные комплексы используют численные методы моделирования и анализа конструкции. Одним из самых популярных из них является метод конечных элементов, который позволяет спроектировать модели любого уровня сложности.

На данный момент существует большое количество программных комплексов по компьютерному моделированию, применяемых в проектировании как для строительства, так и для различных отраслей промышленности. Среди таких программных комплексов имеется ряд наиболее известных и востребованных программ зарубежных и отечественных разработчиков.

Все программы, основанные на конечно-элементном методе, можно условно разделить на две группы. К первой относятся довольно сложные и дорогостоящие программные комплексы, обладающие большими возможностями. Такие программы характеризуются высокой точностью производимых исследований в различных отраслях. Вторая группа программ разрабатывается как частные решения для специализированных задач в конкретной исследуемой области, что указывает на желание разработчиков создать более простой и компактный инструмент.

В РФ для расчетов в гражданском, промышленном и транспортном строительстве используются разрабатываемые в странах СНГ специализированные пакеты, практическое применение которых требует методической проработки.

Библиографический список

1. Решетников А.А., Леонова Д.А., Корнет В.Ю. Несущая способность и живучесть шарнирного узла крепления балок к колоннам на 2-х болтах // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_180_reshetnikov_leonova_kornet.pdf_33bc42fac3.pdf (дата обращения: 19.03.2023).
2. Сравнительная оценка ограждающих конструкций / Н.И. Ватин, А.С. Синельников, А.В. Малышева, Д.В. Немова // СтройПРОФИ. 2013. № 3 (12). С. 30–31.
3. Зинкевич О.Г. Рациональное проектирование конструкций каркаса здания из ЛСТК с учетом их взаимодействия с обшивкой // Строительство уникальных зданий и сооружений. № 8 (23). 2014. С. 93–115.
4. Корнилов Т.А., Герасимов Г.Н. О некоторых ошибках проектирования и строительства малоэтажных домов из легких стальных тонкостенных конструкций в условиях Крайнего Севера // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 41–45.
5. Технология легких стальных тонкостенных конструкций и ее особенности / А.И. Евтушенко, В.Э. Нуриев, П.В. Зотов, И.С. Морева // Инженерный вестник Дона. 2018. № 4 (51). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-legkih-stalnih-tonkostennyh-konstruktsiy-i-eyo-osobennosti/viewer> (дата обращения: 20.03.2023).
6. Осокин А.В. Развитие метода конечных элементов для расчета систем, включающих тонкостенные стержни открытого профиля: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17. М., 2010. 134 с.
7. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. М.: Физматгиз, 1959. 508 с.

SIMULATION OF THIN-WALLED ROD STRUCTURES IN SOFTWARE-COMPUTER COMPLEX

B.A. Gogaladze, S.L. Subbotin, G.S. Tyrin, Yu.S. Bondareva

Abstract. The article presents an overview of current trends in the development of light steel thin-walled structures, their scope, advantages and disadvantages. The theory of thin-walled rods by VZ Vlasov and the finite element method, which underlie the calculation of such structures, are analyzed. Modern software and computing systems for the calculation of light steel thin-walled structures, methods and possibilities for their calculation are considered.

Keywords: light steel thin-walled structures, construction profile, profile, construction, Theory of thin-walled rods, calculation, finite element method, modeling.

Об авторах:

ГОГАЛАДЗЕ Борис Александрович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: gogaladze-b@mail.ru

СУББОТИН Сергей Львович – профессор кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: kaf.kis-303@mail.ru

ТЫРИН Георгий Сергеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: tyrin.goha@mail.ru

БОНДАРЕВА Юлия Сергеевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: ulyatver98@mail.ru

About the authors:

GOGALADZE Boris Aleksandrovich – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: E-mail: gogaladze-b@mail.ru

SUBBOTIN Sergey Lvovich – Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: kaf.kis-303@mail.ru

TYRIN Georgy Sergeevich – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: tyrin.goha@mail.ru

BONDAREVA Yulia Sergeevna – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: ulyatver98@mail.ru

УДК 624.074

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ СТЕРЖНЕЙ
КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛЬЮ
ПРИ ИЗГИБЕ И ЗАКРУЧИВАНИИ**

Б.А. Гогаладзе, С.Л. Субботин, Г.С. Тырин, Ю.С. Бондарева

**© Гогаладзе Б.А., Субботин С.Л.,
Тырин Г.С., Бондарева Ю.С., 2023**

Аннотация. В статье описана разработанная методика моделирования стержня в виде равнополочного уголка № 10 в программно-вычислительном комплексе по методу конечных элементов. Описаны полученные по предложенной методике горизонтальное, вертикальное и суммарное перемещения, а также угол поворота относительно продольной оси.

Ключевые слова: метод конечных элементов, сопротивление материалов, равнополочный уголок, перемещение, нагрузка, элемент.

Для моделирования был принят равнополочный уголок № 10 длиной 1 м, жестко закрепленный с одного конца (рис. 1). Сила $F = 1$ т приложена в точке пересечения полков.



Рис. 1. Схема загрузки уголка

Для упрощения расчетов методом конечных элементов принято сечение из двух прямоугольников, геометрические характеристики которого приведены на рис. 2.

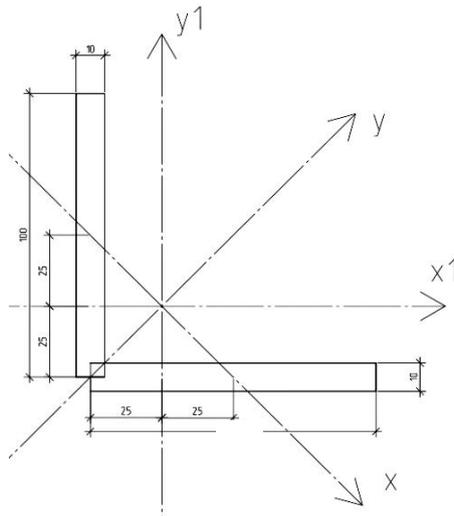


Рис. 2. Геометрические характеристики сечения

Вычислим геометрические характеристики полученного сечения:

$$I_{x1} = I_{y1} = bt\left(\frac{b}{4}\right)^2 + \frac{tb^3}{12} + (bt)\left(\frac{b}{4}\right)^2 = b^3t\left(\frac{1}{16} + \frac{1}{12} + \frac{1}{16}\right) = \frac{b^3t}{4,8};$$

$$I_{x1y1} = -bt\left(\frac{b}{4}\right)^2 \cdot 2 = -\frac{b^3t}{8};$$

$$I_{x_y} = \frac{I_{x1} + I_{y1}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{I_{x1} + I_{y1}}{2}\right)^2 + I_{x1y1}^2} = \frac{b^3t}{4,8} \pm \sqrt{0 + \left(-\frac{b^3t}{8}\right)^2} = b^3t\left(\frac{1}{4,8} \pm \frac{1}{8}\right) =$$

$$= \begin{cases} \frac{b^3 t}{12} = \frac{10^3 \cdot 1}{12} = 83,33 \text{ см}^4 \\ \frac{b^3 t}{3} = \frac{10^3 \cdot 1}{3} = 333,33 \text{ см}^4 \end{cases}$$

Необходимо определить, как будет деформироваться стержень, и установить его прогиб.

Для определения прогиба данного элемента сила и перемещение векторно раскладываются по двум главным осям – x и y (рис. 3) [1]:

$$F_x = F_y = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707, \quad F = 1;$$

$$f = \cos 45^\circ f_y;$$

$$f = \cos 45^\circ f_x.$$

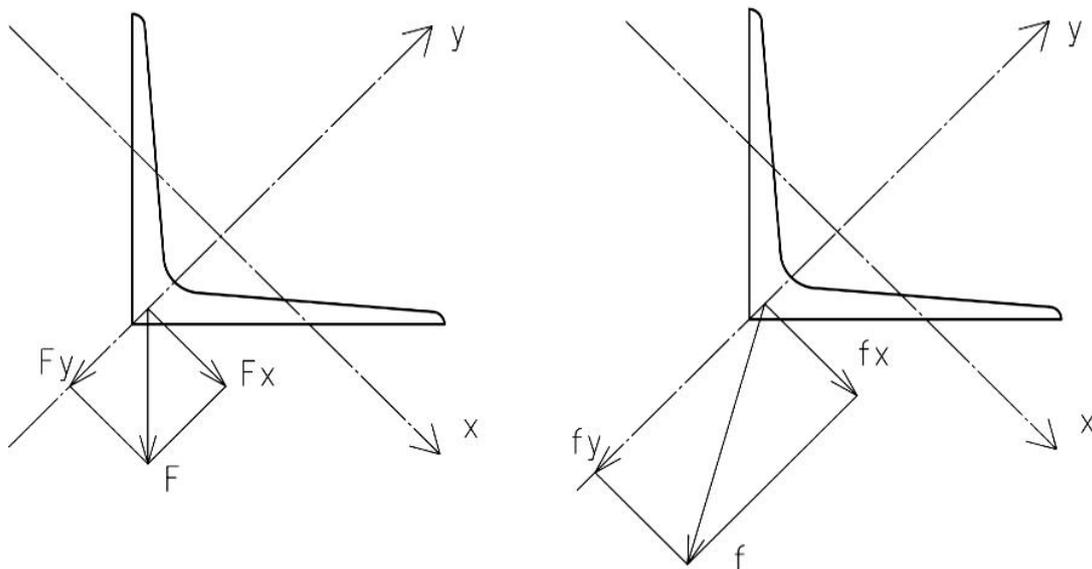


Рис. 3. Схема приложения нагрузки и перемещения

Перемещение относительно главных осей [2]:

$$f_x = \frac{F_x l^3}{3EI_y} = \frac{0,707 \cdot 1^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \cdot 333,33 \cdot 10^{-8}} = \frac{0,707}{209,99} = 3,367 \text{ мм};$$

$$f_y = \frac{F_y l^3}{3EI_x} = \frac{0,707 \cdot 1^3}{3 \cdot 2,1 \cdot 10^7 \cdot 83,33 \cdot 10^{-8}} = \frac{0,707}{52,49} = 13,469 \text{ мм}.$$

Поскольку момент инерции относительно оси y больше, то больше будет и перемещение вдоль этой оси:

$$f_y > f_x.$$

Тогда полное перемещение можно определить векторно:

$$f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} = \sqrt{3,367^2 + 13,469^2} = 13,883 \text{ мм.}$$

Горизонтальное и вертикальное перемещения элемента от заданной нагрузки соответственно составят:

$$f_{гор} = \cos 45^\circ f_x - \cos 45^\circ f_y = 0,707 \cdot (3,367 - 13,469) = 7,142 \text{ мм};$$

$$f_{вер} = \cos 45^\circ f_x + \cos 45^\circ f_y = 0,707 \cdot (3,367 + 13,469) = 11,9 \text{ мм.}$$

Поскольку сила приложена к точке пересечения полок, крутящий момент не возникает и кручение отсутствует (рис. 4).

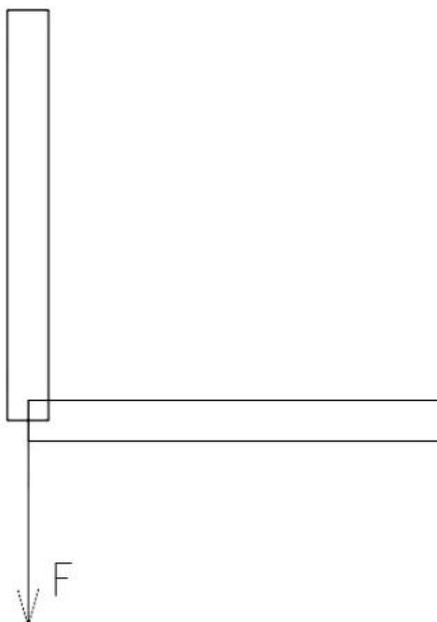


Рис. 4. Схема нагружения

Из расчетов в программно-вычислительном комплексе по методу конечных элементов получены различные перемещения (рис. 5).

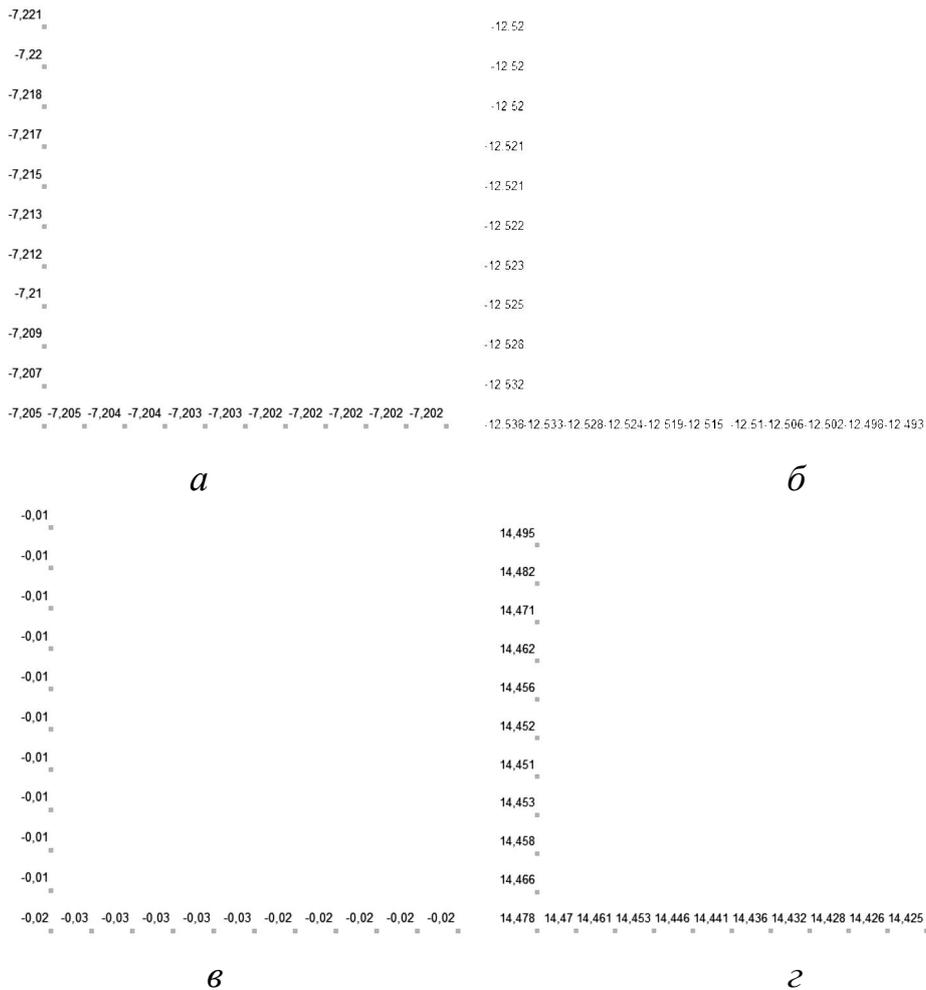


Рис. 5. Перемещения, полученные
 в программно-вычислительном комплексе:
a – горизонтальное; *б* – вертикальное; *в* – суммарное;
г – угол поворота относительно продольной оси

Из расчета по методу конечных элементов видно, что вертикальное перемещение больше горизонтального, а кручение относительно продольной оси практически отсутствует.

Результаты, полученные в программно-вычислительном комплексе и при использовании численного метода, хорошо согласуются:

$$\Delta_{гор} = \left| \frac{7,205 - 7,142}{7,142} \right| \cdot 100 = 0,88 \%;$$

$$\Delta_{вер} = \left| \frac{11,9 - 12,538}{11,9} \right| \cdot 100 = 5,36 \%;$$

$$\Delta_{сум} = \left| \frac{13,883 - 14,478}{13,838} \right| \cdot 100 = 4,3 \%.$$

Таким образом, построенная численная модель может применяться в расчетах.

Библиографический список

1. Власов В.З. Избранные труды: в 3 т. М.: Академия наук СССР, 1963. Т. 2. Тонкостенные упругие стержни. Принципы построения общей технической теории оболочек. 507 с.
2. Ржаницын А.Р. Строительная механика. М.: Высшая школа, 1982. 400 с.

MODELING OF FLEXIBLE RODS BY A FINITE ELEMENT MODEL IN BENDING AND TWISTING

B.A. Gogaladze, S.L. Subbotin, G.S. Tyrin, Yu.S. Bondareva

***Abstract.** The article describes the developed method of modeling a rod in the form of an equal-field corner No. 10 in a software and computing complex using the finite element method. According to the obtained method, horizontal, vertical and total displacement, as well as the angle of rotation relative to the longitudinal axis, were obtained.*

***Keywords:** finite element method, resistance of materials, equal-shelf angle, displacement, load, element.*

Об авторах:

ГОГАЛАДЗЕ Борис Александрович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: gogaladze-b@mail.ru

СУББОТИН Сергей Львович – профессор кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: kaf.kis-303@mail.ru

ТЫРИН Георгий Сергеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: tyrin.goha@mail.ru

БОНДАРЕВА Юлия Сергеевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: ulyatver98@mail.ru

About the authors:

GOGALADZE Boris Aleksandrovich – Master Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: gogaladze-b@mail.ru

SUBBOTIN Sergey Lvovich – Professor of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: kaf.kis-303@mail.ru

TYRIN Georgy Sergeevich – Master Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: tyrin.goha@mail.ru

BONDAREVA Yulia Sergeevna – Master Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: ulyatver98@mail.ru

УДК 691

САМОУПЛОТНЯЮЩИЙСЯ БЕТОН НА ОСНОВЕ РЕЦИКЛИНГОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ, МОДИФИЦИРОВАННЫЙ КВАРЦЕВОЙ МУКОЙ И ГИПЕРПЛАСТИФИКАТОРОМ

Д.С. Городничев, Ю.Ю. Курятников, В.В. Белов, В.И. Трофимов

© Городничев Д.С., Курятников Ю.Ю.,
Белов В.В., Трофимов В.И., 2023

Аннотация. В статье указан состав самоуплотняющегося бетона, модифицированного комплексом добавок на основе кварцевой муки и поликарбонатного гиперпластификатора. Приведены результаты проверки их синергетического влияния на физико-механические свойства бетонной смеси самоуплотняющегося бетона.

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, микронаполнители, кварцевая мука, гиперпластификатор.

ВВЕДЕНИЕ

Самоуплотняющийся бетон (СУБ) – это высокотехнологичный материал, который под влиянием собственного веса может самостоятельно уплотняться, полностью заполняя объем, в том числе и в конструкциях тяжелых форм. Рецепт бетона определяется необходимостью применения эффективных пластифицированных смесей нового поколения, а также минеральных микронаполнителей, оптимизированных по гранулометрическому и минеральному составам. Самоуплотняющиеся бетонные смеси, в отличие от обычных, легко проникают в густоармированные изделия, а также заполняют формы сложной конфигурации.

Недостатки СУБ:

повышенное значение коэффициента ползучести (в принятых допустимых пределах);

большая усадка;

более низкая упругость бетонов из самоуплотняющихся смесей (до 10 %) по сравнению с обычным и мелкозернистым цементобетоном в связи

с повышенным содержанием сухих мелкодисперсных компонентов и малым количеством составляющих крупных фракций.

Решить данные проблемы возможно с помощью получения оптимального сочетания добавок-модификаторов, в ряде случаев наряду с другими органическими и минеральными материалами, позволяющими управлять реологическими свойствами бетонных смесей и модифицировать структуру цементного камня на микроуровне таким образом, чтобы в итоге обеспечить эксплуатационную надежность и долговечность конструкций и сооружений [1].

Установлено, что характер и эффективность модифицированной структуры цементных систем предопределяются прежде всего химическим составом добавок. Именно такой подход можно считать наиболее объективным и экономически выгодным на стадии подбора оптимального состава бетона [2]. В связи с этим приобретают актуальность исследования составов, модифицируемых комплексом добавок на основе кварцевой муки и поликарбоксилатного гиперпластификатора [3].

Производственный опыт показывает, что химические добавки, являясь модификаторами структуры бетона, в значительной степени изменяют его физико-механические характеристики и формируют себестоимость железобетонных изделий и конструкций. Должны быть всесторонне исследованы группы добавок для СУБ, такие как гиперпластификаторы, стабилизаторы, модификаторы вязкости и др. [4].

Преимущество гиперпластификаторов заключается в их более высокой водопонижающей способности. За счет этого обеспечивается получение бетонов с высокими показателями прочности, морозостойкости, водонепроницаемости и долговечности. Данное свойство можно использовать и в целях экономии цемента, и для получения высокоподвижных СУБ, само появление которых стало возможным только благодаря гиперпластификаторам [5].

Введение гиперпластификатора способно изменять как пористость цементного камня, так и состояние продуктов гидратации, модуль упругости которых различен, а также позволяет целенаправленно регулировать реологические свойства бетонных смесей, изменять структуру цементного камня, обеспечивать надежность работы бетонных конструкций [6].

В наши дни все более широкое применение в технологии бетонных работ находят химические добавки высокоэффективных гиперпластификаторов на поликарбоксилатной и полиакрилатной основе вследствие их более высокого пластифицирующе-водоредуцирующего эффекта в бетонных смесях по сравнению с обычными пластификаторами на основе лигносульфонатов, полиметиленафталинсульфонатов и полиметиленамелинсульфонатов [7].

Наличие частичек кварцевой муки, выполняющих функцию центров осаждения гидросиликатного геля, способствует увеличению прочности,

снижает водоотделение, а также дать возможность получать СУБ с компенсированной усадкой или остаточным расширением, что обеспечивает их повышенную трещиностойкость и долговечность [8].

На рис. 1, 2 представлена сложная структура цементирующего вещества. В основной гелеподобной массе новообразований наблюдаются иглообразные кристаллы этtringита, заполняющие свободные полости. Этtringит образуется в свободных объемах цементирующего вещества. На электронных микрофотографиях образцов цементного камня с комплексным модификатором наблюдается заполнение пор гидросульфатом алюмината кальция, при этом формируются кристаллические новообразования значительно меньшей дисперсности, чем в составе без добавления комплексного модификатора. Увеличение концентрации гидросульфата алюмината кальция и удельной поверхности гидратных фаз как в общей структуре цементного камня, так и в дефектных областях пространственного скелета приводит к упрочнению материала [9].

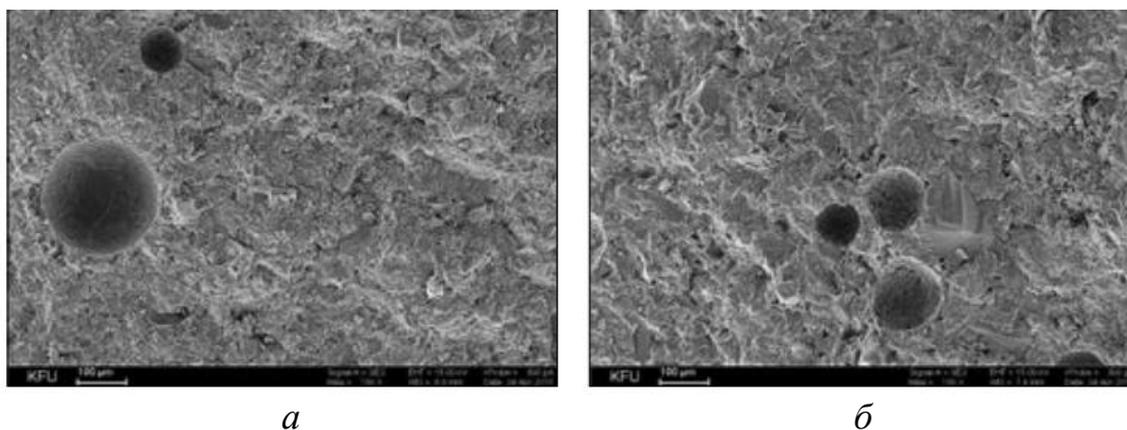


Рис. 1. Электронно-микроскопические снимки образцов цементного камня (x100): *а* – без добавки; *б* – с комплексным модификатором

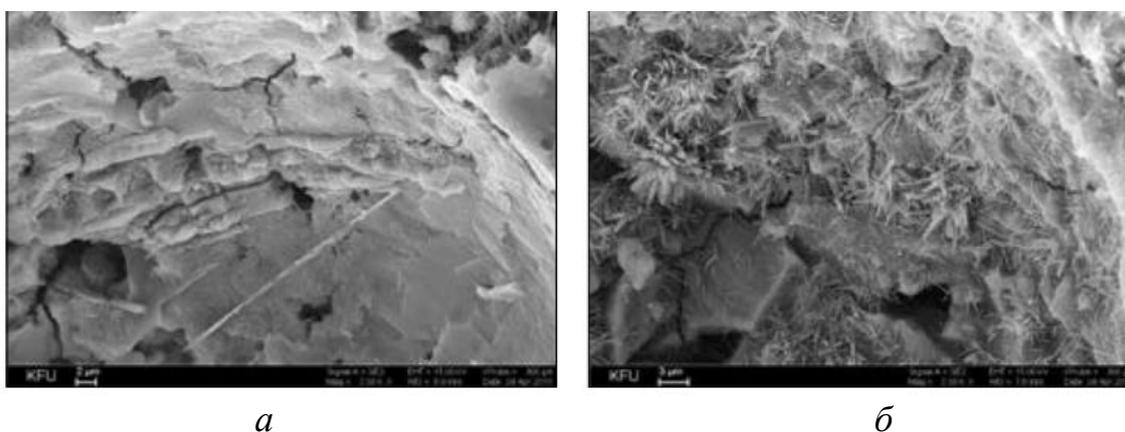


Рис. 2. Структура цементного камня нормального твердения (x2 000): *а* – без добавки; *б* – с комплексным модификатором

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель данной работы состоит в теоретическом и экспериментальном обосновании получения СУБ на основе установления закономерностей влияния кварцевой муки и гиперпластификатора на структурообразование и свойства бетонной смеси и бетона.

Задачей работы является построение с помощью планированного эксперимента математических моделей зависимости физико-механических свойств СУБ от добавления кварцевой муки и отечественного гиперпластификатора «Полипласт ПК» (тип S), а также анализ рентабельности использования рециклингового заполнителя вместо природного.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении исследований применялся портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н («Евроцемент 500 Экстра») по ГОСТ 31108.

В качестве мелкого заполнителя использовался песок строительный с модулем крупности $M_{кр} = 2,34$ по ГОСТ 8736. Основные свойства песка, определенные по стандартным методикам в соответствии с ГОСТ 8736-2014, представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Основные физико-механические свойства кварцевого песка

Класс	Модуль крупности	Насыпная плотность, кг/м ³	Истинная плотность, г/см ³
II	2,4	1 450	2,65

Таблица 2

Гранулометрический состав кварцевого песка

Набор сит, мм	Частный остаток, г	Частный остаток, %	Полные остатки, %
5	0	0	0
2,5	11	1,1	1,1
1,25	256	25,6	26,7
0,63	272	27,2	53,9
0,315	145	14,5	68,4
0,16	172	17,2	85,6
Менее 0,16	144	14,4	100

В качестве крупного заполнителя применялся дробленый вторичный щебень фракции 5–10 мм (рис. 3).



Рис. 3. Дробленый щебень фракции 5–10 мм

Для регулирования подвижности бетонных смесей использовался гиперпластификатор «Полипласт ПК» (тип S) на основе поликарбоксилатных эфиров, основные свойства которого приведены в табл. 3.

В качестве микронаполнителя была принята кварцевая мука со средним размером частиц 17 и 34 мкм (марок 15 и 30 соответственно) (рис. 4).

Таблица 3

Характеристики гиперпластификатора «Полипласт ПК» (тип S)

Сырьевая основа	Физическое состояние	Плотность, г/см ³	pH
Поликарбоксилатные эфиры	Жидкость	Не менее 4	4



Рис. 4. Кварцевая мука

Для нахождения оптимального состава СУБ на основе кварцевой муки и гиперпластификатора применялся метод математического планирования экспериментов.

Для построения математических моделей зависимостей предела прочности при сжатии образцов от соотношения содержания кварцевой муки и гиперпластификатора в составе бетонной смеси проводили двухфакторный планированный эксперимент типа В₂, который позволяет получать нелинейные квадратичные модели и обладает хорошими статистическими характеристиками.

В качестве переменных факторов были назначены:

- 1) содержание кварцевой муки, % от массы вяжущего, – X_1 ;
- 2) количество гиперпластификатора, % от массы вяжущего, – X_2 .

Матрица планированного эксперимента типа В₂ приведена в табл. 5.

Таблица 5

Матрица планированного эксперимента

Номер опыта	Уровни факторов		Значения факторов, %		Состав смеси на 1 м ³ , кг				
	X ₁	X ₂	Кварцевая мука	Гиперпластификатор	Кварцевая мука	Гиперпластификатор	Цемент	Щебень	Песок
1	-1	-1	20	1	85	5,4	428	647	894
2		+1		1,5		8,1			
3	+1	-1	30	1	120	5,4	394		
4	+1	+1		1,5		8,1			
5	0	-1	25	1	105	5,4	410		
6	0	+1		1,5		8,1			
7	-1	0	20	1,25	85	6,75	428		
8	+1	0	30		120		394		

Состав смеси приведен в табл. 6.

Таблица 6

Состав смеси на одну форму 10x10x10

№ п/п	Гиперпластификатор, г	Кварцевая мука, г	Цемент, г	Щебень, г	Песок, г	Вода, г
1	10,8	170	856	1 294	1 877	450
2	16,2					365
3	10,8	240	788			450
4	16,2					380
5	10,8	210	820			450
6	16,2					380
7	13,5	170	856			420
8		240	788			
9		210	820			

Рециклинговый (вторичный) щебень имеет более низкие показатели по прочности, а также истинной и насыпной плотности по сравнению с гранитным (контрольным) щебнем. Кроме того, рециклинговый щебень характеризуется более высокой пористостью и пустотностью, а также более высоким водопоглощением. Снижение прочности рециклингового щебня связано с присутствием в его составе цементно-песчаного камня [10].

Улучшить характеристики вторичного щебня позволяет его активация. Согласно [11, 12], механоактивация щебня обеспечивает увеличение прочности бетона на 12–24 %.

Щебень дробят до фракции 5–10 мм с последующей активацией, которая осуществляется в смесителе. Щебень вводится в первую очередь, затем добавляется часть воды затворения. При перемешивании щебня и воды мелкодисперсные пылевидные частицы переходят в водную фазу, что в итоге приводит к снижению водопотребности бетона вследствие удаления пылевидных частиц. После этого в смесь добавляется цемент и происходит распределение мелкодисперсных частиц между частицами цемента. Система «пылевидные частицы – цемент» осаждается на поверхности зерен заполнителя, т. е. мелкодисперсные пылевидные частицы включаются в цементную матрицу без образования прослоек между цементным камнем и зёрнами заполнителя, благодаря чему прочность бетона повышается [13, 14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведения эксперимента были изготовлены стандартные образцы 10x10x10 см для испытаний на прочность при сжатии. Составы смесей и результаты испытаний приведены в табл. 7.

Таблица 7

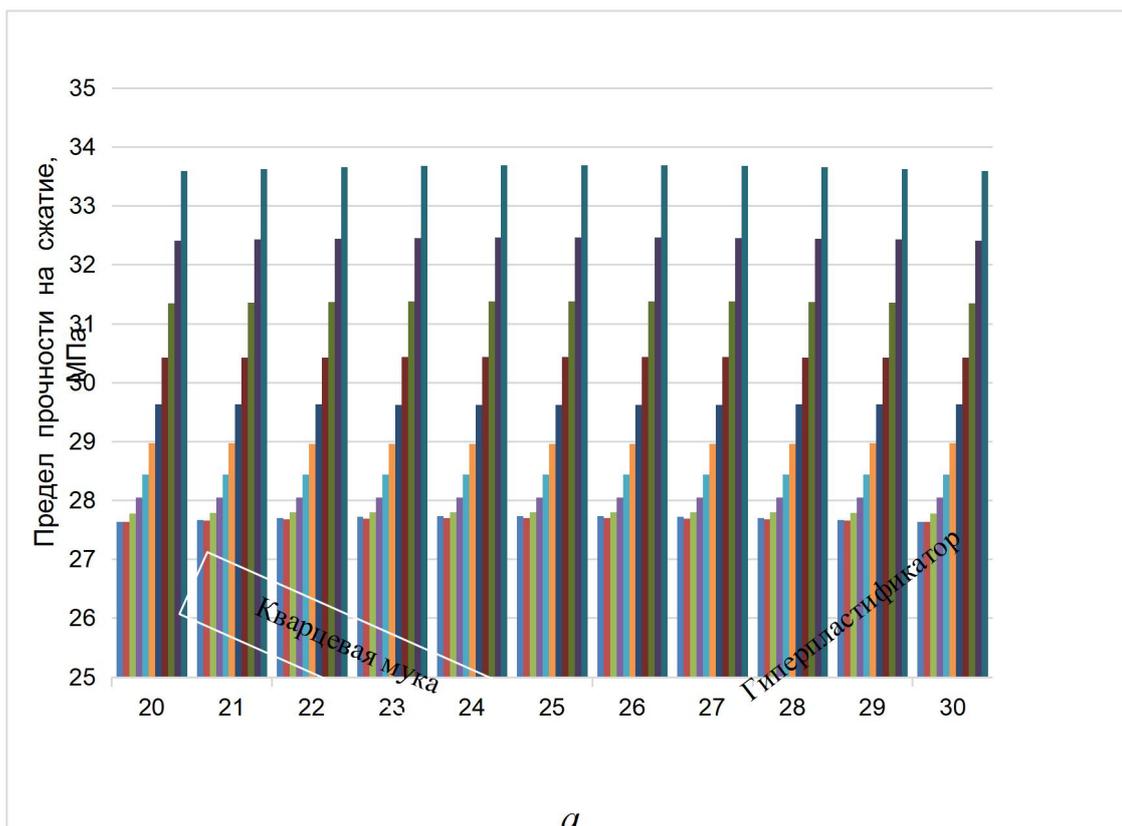
Составы смесей и результаты испытаний образцов

№ п/п	Кварцевая мука, %	Добавка, %	Расплыв малого конуса, см	Плотность бетонной смеси, кг/м ³	Средняя плотность образцов, кг/м ³	Водовяжущее соотношение	Предел прочности на сжатие, МПа
1	20	1	20	2 175	2 065	0,5	27,3
2		1,5	21	2 215	2 185	0,42	34,7
3	30	1	19	2 165	2 147	0,5	26,9
4		1,5		2 235	2 197	0,43	33,9
5	25	1	20	2 220	2 175	0,5	28,9
6		1,5	21	2 255	2 160	0,43	32,5
7	20	1,25	20	2 190	2 121	0,47	29
8	30	1,25	21	2 165	2 133		28,9
9	25	1,25	20	2 095	2 050		29

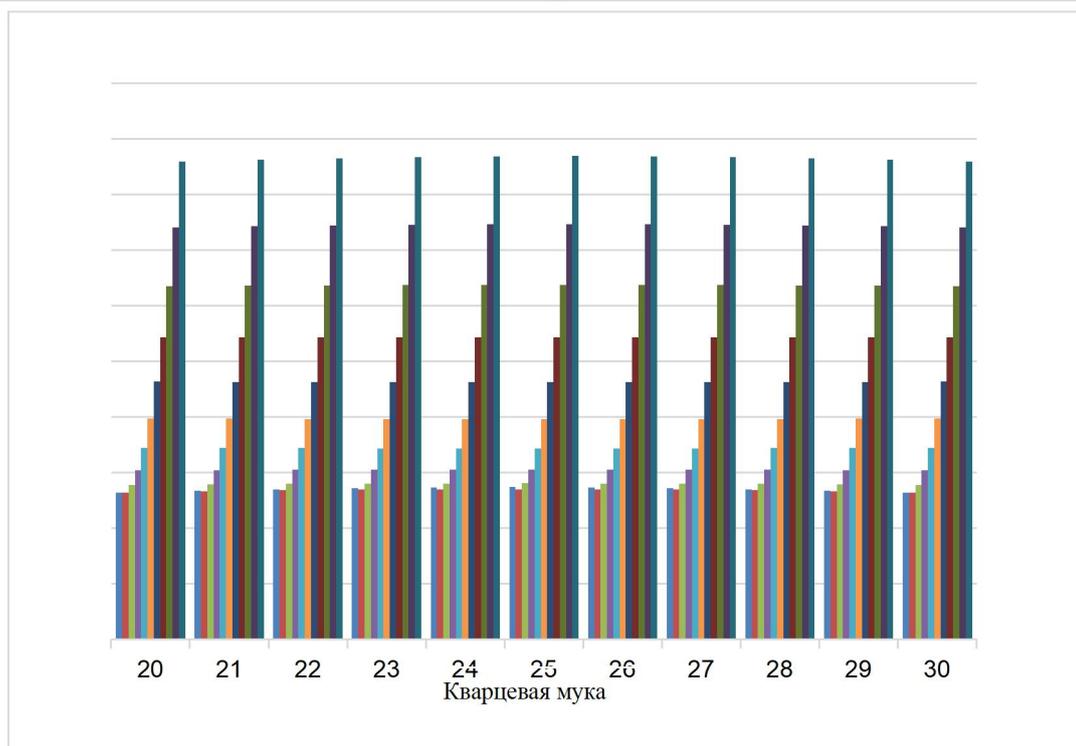
Уравнение регрессии в натуральных переменных имеет вид

$$Y(X1X2) = 57,77 - 1,75X1 - 23,08X2 + 1,4X1X2.$$

Полученная рабочая модель для определения оптимального состава бетонной смеси представлена графически на рис. 5.



a



б

Рис. 5. Диаграмма зависимости предела прочности при сжатии от процентного содержания гиперпластификатора и кварцевой муки:
a – вид 1; *б* – вид 2

Исходя из графического и математического представления полученной модели, можно сделать вывод о том, что количество вводимой добавки влияет на прочность образцов. Экстремум прочности на сжатие достигается при введении 1,5 % гиперпластификатора «Полипласт ПК» (тип S) от массы цемента и составляет 34 МПа. Различное дозирование вводимой взамен цемента кварцевой муки не оказывает существенного влияния на прочность образцов.

Аналогичным образом построим модель зависимости средней плотности образцов от варьируемых параметров (рис. 6).

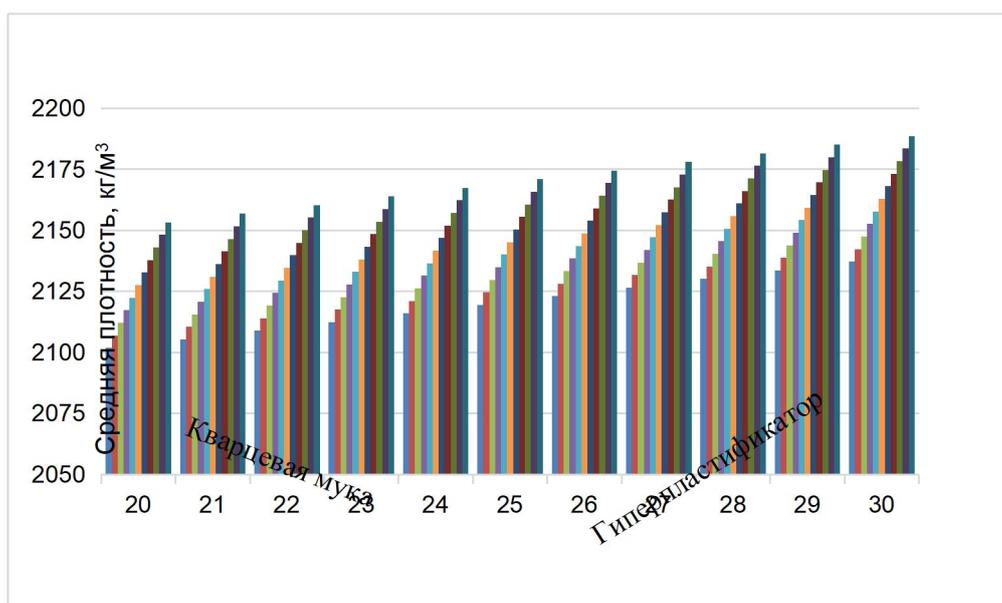


Рис. 6. Диаграмма зависимости средней плотности образцов от процентного содержания добавки гиперпластификатора Полипласт ПК тип S и кварцевой муки

Получим математическую модель:

$$Y(X1X2) = 1\,928,17 + 3,53X1 + 103X2,$$

на основании которой можно сделать вывод о том, что количественное содержание кварцевой муки и добавки гиперпластификатора напрямую влияет на среднюю плотность образцов: чем выше процентное содержание указанных компонентов, тем выше средняя плотность бетона. При добавлении 1,5 % гиперпластификатора и 30 % кварцевой муки от массы цемента средняя плотность образцов составляет 2 197 кг/м³ (рис. 7).

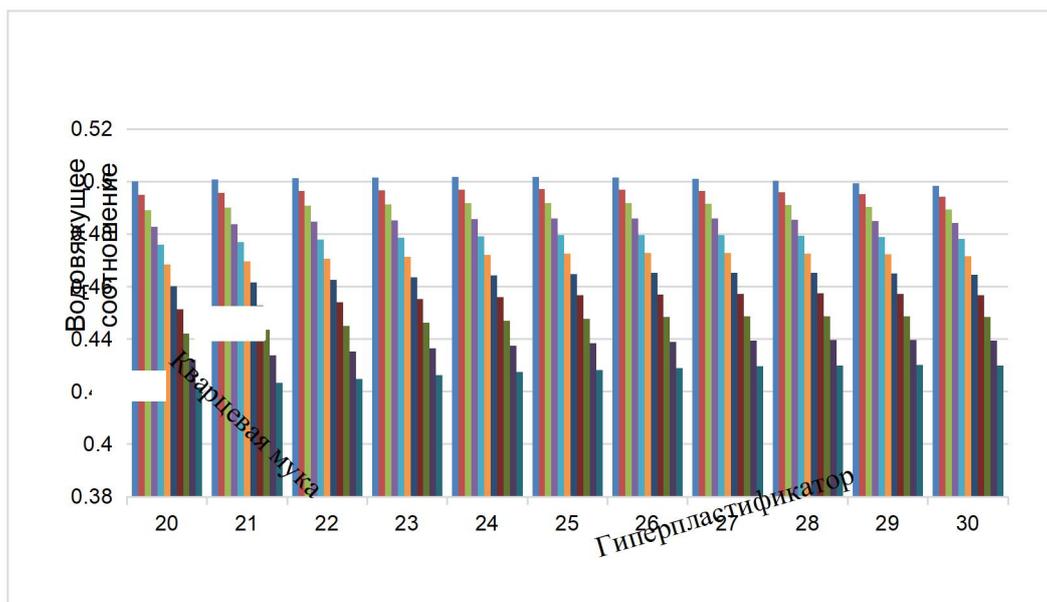


Рис. 7. Диаграмма зависимости водовяжущего отношения от процентного содержания добавки гиперпластификатора «Полипласт ПК» (тип S) и кварцевой муки

Полученная математическая модель

$$Y(X1X2) = 0,53 - 0,0022X1 - 0,05X2 + 0,002X1X2$$

показала, что введение гиперпластификатора позволяет снизить водовяжущее соотношение. При введении добавки 1,5 % от массы цемента водовяжущее соотношение составляет 0,4.

Результаты проведенного исследования показывают целесообразность применения кварцевой муки в качестве микронаполнителя в сочетании с гиперпластификатором, который обеспечивает значительный прирост в прочности образцов. На основе построенного графика (см. рис. 5) можно сделать вывод, что нижнему уровню варьирования содержания добавки соответствует низкое значение прочности. Изменение дозировки кварцевой муки не оказывает значительного влияния на прочность образцов. С увеличением количества модифицирующих добавок плотность образцов возрастает, достигая максимальных значений на верхних уровнях варьирования компонентов. С увеличением процентного содержания гиперпластификатора водовяжущее соотношение уменьшается.

Для сравнения были испытаны образцы с природным и вторичным щебнем. Результаты (а именно показатели прочности экспериментального состава образцов 10x10x10) представлены ниже:

Предел прочности при сжатии образца, МПа,	
на природном щебне	на вторичном щебне
30,64	35,04

Таким образом, применение вторичного щебня не оказывает отрицательного влияния на прочностные свойства материала, позволяет получить бетон класса В25. Благодаря добавкам-модификаторам процесс внедрения рециклинга в производство самоуплотняющихся бетонных смесей становится возможным.

Как перспективное направление рационального природопользования, рециклинг позволит снизить объемы строительных, рекультивировать имеющиеся полигоны и постепенно вводить в хозяйственный оборот земельные ресурсы, освобожденные от свалок и полигонов [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Физико-механические свойства бетона зависят от количественного содержания модифицирующих добавок. Экстремум прочности на сжатие (34 МПа) достигается при введении гиперпластификатора «Полипласт ПК» (тип S) в количестве 1,5 % от массы цемента. В свою очередь добавление кварцевой муки взамен части цемента не оказывает значительного воздействия на показатели прочности образцов в возрасте 28 сут.

Синергетическое влияние на плотность образцов бетона оказывает совместное использование кварцевой муки и гиперпластификатора. Так, при введении 1,5 % гиперпластификатора и 30 % кварцевой муки от массы цемента плотность образцов достигает 2 200 кг/м³.

Добавление гиперпластификатора позволяет снизить водовяжущее отношение до 0,4.

Комплексное применение модификаторов дает возможность заменить природный щебень на вторичный без потери прочности.

Библиографический список

1. Коваленко А.В., Юзюк А.Ю. Оптимизация состава самоуплотняющегося бетона для ремонта гидротехнических сооружений // Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. 2017. № 2 (104). С. 66–68.
2. Макушина Ю.В. К вопросу об идентификации добавок-пластификаторов для бетонов // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2022. № 2 (51). С. 90–96.

3. Муртазаева Э.Д., Тутаяев М.С., Умарова М.С. К вопросу получения самоуплотняющихся бетонов с использованием вторичного сырья // Молодежь, наука, инновации: сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции. Грозный: ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, 2020. С. 212–215.
4. Рауткин А.В., Касторных Л.И. Выбор химических модификаторов для обеспечения растекаемости самоуплотняющихся бетонных смесей // Молодой исследователь Дона. 2017. № 4 (7). С. 118–126.
5. Беднев Д.С., Добродеева А.С., Макеев А.И. Применение пылевидной фракции отсевов камнедробления для самоуплотняющихся бетонов // Студент и наука. 2020. № 1 (12). С. 99–105.
6. Самоуплотняющийся бетон с использованием добавок-модификаторов / Е.Ж. Кусаинов [и др.] // Наука и техника Казахстана. 2022. № 2. С. 95–103.
7. Красовский П.С., Ельцова Н.А., Сижук А.Т. Эффективность самоуплотняющихся бетонов путем использования гиперпластификаторов // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием (Хабаровск, 17–19 апреля 2018 года), проходившей в рамках молодежного научного форума «Интеллектуальный потенциал молодежи – Дальневосточному региону»: в 2 т. Хабаровск: ДВГУПС, 2018. Т. 1. С. 377–380.
8. Харченко И.Я., Баженов Д.А. Эффективный самоуплотняющийся мелкозернистый бетон с компенсированной усадкой // Строительные материалы. 2018. № 5. С. 48–52.
9. Богданов Р.Р., Ибрагимов Р.А. Состав, свойства и микроструктура модифицированного самоуплотняющегося бетона для гидроизоляции плоских кровель зданий // Строительные материалы. 2017. № 7. С. 39–43.
10. Луканин А.В. Полная переработка бетонолома во вторичный щебень // Экология и промышленность России. 2012. № 4. С. 16–19.
11. Использование механоактивированных отсевов дробления бетонного лома в производстве бетонокомпозитов / С.-А.Ю. Муртазаев, М.С. Сайдумов, М.А.-В. Абдуллаев, А.А. Хасиев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2011. № 22. С. 136–140.
12. Курятников Ю.Ю. Способы переработки бетонного лома для получения вторичного щебня в качестве минерального сырья // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2020. № 4 (8). С. 103–109.

13. Курятников Ю.Ю. Опыт использования бетонного лома на АО «ТЖБИ-4» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.cpi-worldwide.com/ru/journals/artikel/63173> (дата обращения: 10.05.2023).

14. Фахратов М.А., Кужин М.Ф. Организация переработки отходов бетона и вторичное использование бетонов в строительстве // Системные технологии. 2018. № 1 (26). С. 100–103.

15. Ширяева Ю.В. Перспективы переработки строительных отходов // Научный журнал молодых ученых. 2022. № 2 (27). С. 81–87.

SELF-COMPACTING CONCRETE BASED ON RECYCLED AGGREGATE MODIFIED WITH QUARTZ FLOUR AND HYPERPLASTICIZER

D.S. Gorodnichev, Yu.Yu. Kuryatnikov, V.V. Belov, V.I. Trofimov

***Abstract.** The article specifies the composition of self-compacting concrete modified with a complex of additives based on quartz flour and polycarboxylate hyperplasticizer. The results of testing their synergistic effect on the physical and mechanical properties of the concrete mixture of self-compacting concrete are presented.*

***Keywords:** self-compacting concrete, microfillers, quartz flour, hyperplasticizer.*

Об авторах:

ГОРОДНИЧЕВ Дмитрий Сергеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: gorodnichev.m16@mail.ru

ТРОФИМОВ Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: vitrofa@mail.ru

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

КУРЯТНИКОВ Юрий Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: yuriy-@yandex.ru

About the authors:

GORODNICHEV Dmitry Sergeevich – Master Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: gorodnichev.m16@mail.ru

TROFIMOV Valery Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vitrofa@mail.ru

BELOV Vladimir Vladimirovich – Advisor to RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

KURYATNIKOV Yury Yuryevich – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

УДК 691.587

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ АДГЕЗИИ МЕЖДУ РЕМОНТНОЙ БЕТОННОЙ СМЕСЬЮ И БЕТОННЫМ ОСНОВАНИЕМ

А.С. Джабаров, В.В. Белов

© Джабаров А.С., Белов В.В., 2023

***Аннотация.** В статье рассматриваются способы повышения адгезии между ремонтной бетонной смесью и бетонным основанием. Указывается, что на величину адгезионной прочности влияют возраст ремонтируемого основания и его обработка перед нанесением бетонной смеси, вид применяемого цемента, вид заполнителей, наполнителей и различных модификаторов, а также условия, при которых наносимая ремонтная бетонная смесь будет твердеть.*

***Ключевые слова:** повышение адгезии, ремонтная бетонная смесь, бетонное основание, адгезионная прочность.*

Для ремонтных составов одной из труднореализуемых задач является сцепление (адгезия) с поверхностью ремонтируемого бетона [1].

Сцепление ремонтного состава с ремонтируемым основанием обеспечивается адгезией – способностью материала прилипать за счет межмолекулярного взаимодействия, а также диффузией, т. е. взаимопроникновением одного материала в другой: «При укладке бетонной смеси в непосредственном контакте со зрелым бетоном в нормальных условиях в работу вступают адгезия, бародиффузия, термодиффузия и диффузия за счет градиента концентраций» [2]. При соприкосновении бетонной смеси и

основания продукты гидратации цемента (гидросиликаты, гидроксиды) проникают в ремонтируемую поверхность и превращаются сначала в гель, а затем в кристаллические сростки, тем самым обеспечивая качественное связывание двух фаз. Однако стоит учитывать, что при малом градиенте давления, температуры и концентраций проникновение гидратов в ремонтируемое основание будет слабым [2].

«Адгезия и сцепление разнородных и однородных тел сплошной структуры поверхности обусловлена донорно-акцепторным взаимодействием между ионами, молекулами и диполями» [3]. Наиболее прочные связи возникают при ровной и чистой поверхности и образовании связей Ca-O, Mg-O, Si-O. Адгезионная прочность между различными фазами улучшается в результате взаимодействия высокощелочной среды бетона с компонентами заполнителей и наполнителей, содержащими в своем составе минералы кислого состава [3], за счет новообразований.

На величине адгезионной прочности сказывается возраст ремонтируемого основания и его обработка перед нанесением бетонной смеси, виды применяемого цемента [4], заполнителей, наполнителей и различных модификаторов. Не стоит забывать и об условиях, при которых будет происходить твердение наносимой ремонтной бетонной смеси. В статье [5] устанавливалось, что смесь, набирающая свою прочность во влажных условиях имеет лучшие физико-механические характеристики (в отличие от твердения в сухих условиях).

После проведения ремонтных работ возможны нарушения «монолитности» в связи с увеличением разности деформаций основания и ремонтной смеси: при $\varepsilon < \varepsilon_{\text{пред}}$ произойдет отслоение слоя ремонтного бетона; при $\varepsilon > \varepsilon_{\text{пред}}$ наступит растрескивание слоя. Однако при $\varepsilon > \varepsilon_{\text{пред}}$ может и не быть трещин, если размер изделия меньше расстояния между трещинами [6]. Значительные деформации могут возникнуть в результате некорректного подбора состава бетонной смеси, ухода за нанесенной ремонтной смесью не по регламенту, воздействия погодных условий.

Введение в состав бетонной смеси 10 % гранитного порошка с удельной поверхностью 3 650 см²/г может улучшить адгезионную прочность приблизительно на 10 % с увеличением или уменьшением этого количества прочность бетона снижается [5]. Добавление фиброволокон в состав смеси также способствует улучшению этого показателя: введение 1 % полипропиленовой фибры длиной 19 мм повышает прочность на 33 % (рис. 1 и 2) [7].

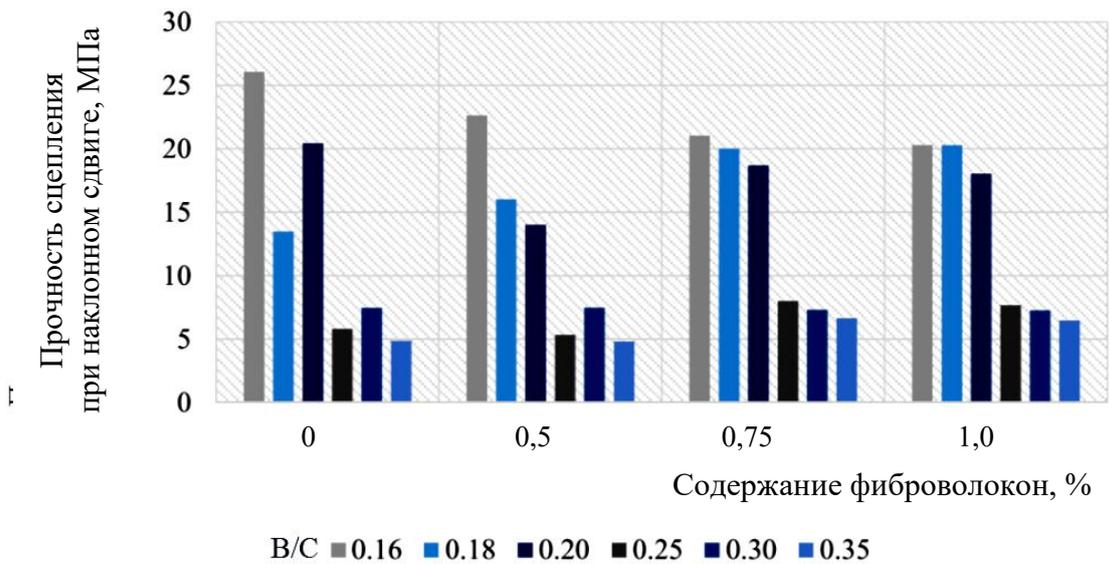


Рис. 1. Зависимость прочности сцепления от количества волокон при наклонном сдвиге при различных соотношениях воды и связующего [7]

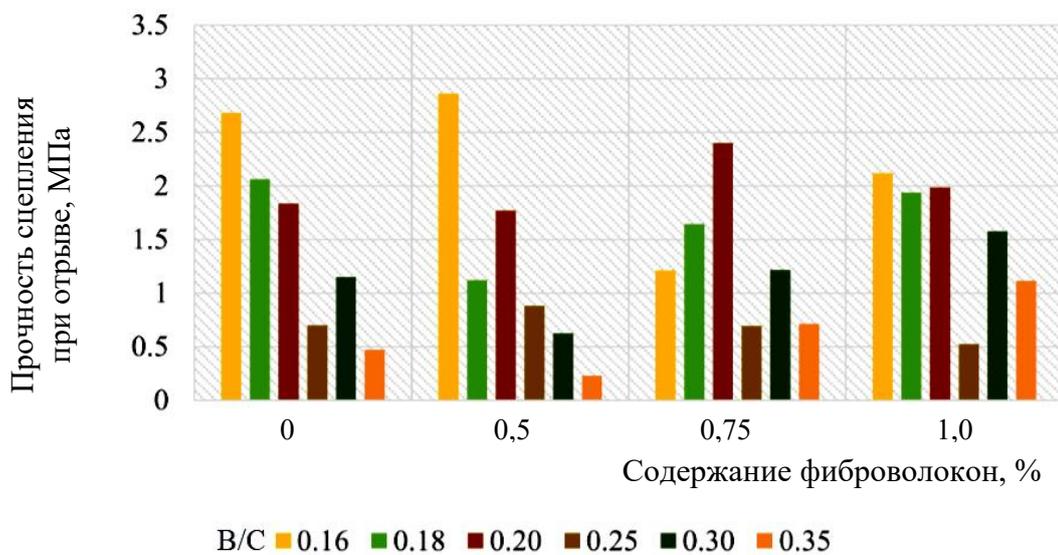


Рис. 2. Зависимость прочности сцепления при отрыве от содержания волокон при различных соотношениях воды и связующего [7]

Тонкодисперсные минеральные добавки (гранитный порошок, карбонатный (известняковый) наполнитель и др.) улучшают гранулометрический состав заполнителей, вяжущего и способствует уплотнению контактной зоны. Следовательно, улучшается сцепление, а кроме того, добавка вызывает уменьшение капиллярной пористости в бетоне [8].

В табл. 1 и 2 приведены химические составы гранитного порошка, известнякового наполнителя, кварцевого песка и портландцемента.

Таблица 1

Химический состав гранитного порошка
и портландцемента (ЦЕМ I 42,5 Н) [5]

Химический состав (массовая доля, %)	Гранитный порошок	ЦЕМ I 42,5
CaO	8,30	56,62
SiO ₂	53,63	16,03
Al ₂ O ₃	19,90	6,10
MgO	5,54	2,61
Fe ₂ O ₃	2,42	2,44
Na ₂ O	3,46	0,00
K ₂ O	3,29	7,32
п.п.п.	3,46	8,88

Таблица 2

Химический состав отхода дробления известняка, кварцевого песка,
портландцемента (ЦЕМ I 42,5 Н) [9]

Химический состав (массовая доля, %)	Отход дробления известняка	Кварцевый песок	ЦЕМ I 42,5 Н
CaO	44,20	0,01	68,20
SiO ₂	7,49	99,40	20,90
Al ₂ O ₃	3,33	0,25	6,00
MgO	0,24	0,12	3,51
Fe ₂ O ₃	2,57	–	1,41
Na ₂ O	–	–	2,32
K ₂ O	–	–	0,21
SO ₃	–	0,03	0,64
TiO ₂	0,24	0,07	–
п.п.п.	38,70	–	1,54

Известняк и известняковый наполнитель являются распространенными материалами в Тверской области. Применение местного сырья в бетонах экономически целесообразно.

При модифицировании бетонных смесей наполнитель встраивается в структуру гидратов [10] и его структурообразующая поверхность способна играть роль подложки для ориентированной кристаллизации новообразований (рис. 3) [3].

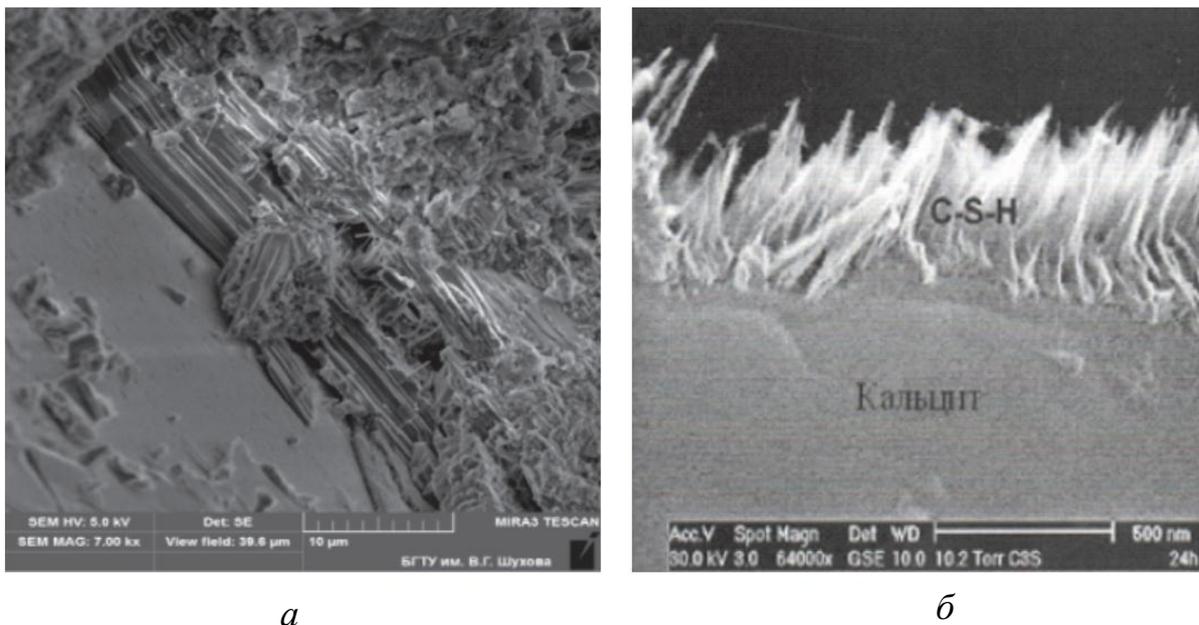


Рис. 3. Кристаллизация портландита на поверхности контакта:
а – кварцевого песка с цементным камнем;
б – карбоната кальция (кальцита) с указанным камнем [3]

Высокой прочности сцепления можно добиться введением 2 % металлических фиброволокон, 2,5 % наностекла и 2,5 % порошка железного шлака [11].

Высококачественный мелкозернистый бетон (в отличие от немодифицированного мелкозернистого), пластифицированный добавкой Асе 388 в сочетании с использованием золы уноса, золы рисовой шелухи и тонкодисперсных полипропиленовых армирующих волокон, характеризуется высокими прочностными и адгезионными показателями [12].

Водоцементное отношение (В/Ц) оказывает существенное влияние на адгезию, как и на другие характеристики бетона. Если смесь будет иметь высокую вязкость, адгезия к основанию будет слабой, а при низкой вязкости относительно оптимального значения В/Ц возникнут трудности с нанесением на основание [5]. Согласно данным статьи [7], с возрастанием В/Ц от 0,25 до 0,30 сцепление увеличивается на 23 % при работе с Cemfix 2CS, а при В/Ц = 0,35 снижается на 59 %. Таким образом, оптимальное В/Ц способствует улучшению сцепления смеси с основанием.

Для повышения адгезии материалов применяются также многослойные углеродные нанотрубки (УНТ) и кремнезоль. Раствор кремнезоля состоит из 30%-й водной дисперсии кремния с максимальным размером фракций 5,0–9,5 нм, а раствор УНТ представлял собой 3%-ю водную дисперсию УНТ с максимальным диаметром 10,0–15,0 нм. Введение в состав наноразмерных модификаторов позволяет повысить адгезию

в 1,5–2 раза. Прочность в контактной зоне при испытании на сдвиг можно увеличить до 6,5–10,5 МПа, а на отрыв – до 2,5–5,5 МПа [13, 14].

Высокая адгезия может достигаться с помощью редиспергируемого порошка – сополимера винилацетата и этилена, проникающей композиции дегидрола и наноразмерных добавок [13].

Для повышения адгезии в состав ремонтируемой бетонной смеси вводят дегидрол – добавку в виде поливинилацетатной дисперсии. Однако, как выше упоминалось, адгезионная прочность зависит как от вида, так и от состояния ремонтируемого основания. Для бетонных и железобетонных оснований целесообразно применять цементсодержащие растворы с максимальной крупностью зерен наполнителей (заполнителей) до 0,63 мм. Такие смеси обладают хорошей адгезией к основаниям [13, 15]. К тому же это позволит нанести смесь с минимальным количеством пор и пустот.

Авторами [4] выявлено улучшение прочности сцепления на 30 % при дозировке редиспергируемой добавки 2 % и на 130 % при увеличении ее содержания до 3 %. В статье [16] установлено, что использование редиспергируемых добавок и суперпластификаторов снижает средний размер кристаллов этtringита, причем кристаллы образуются в значительном количестве и распределены равномерно по всему объему образца. Столь большое количество этtringита в смеси, в состав которой входят сульфалоюминаты и алюминаты, способствует повышению плотности и прочности цементного камня, а также позволяет получить бетонные смеси с низкой водонепроницаемостью и высокой адгезионной прочностью [16].

Необходимо учитывать также способ испытания образцов на адгезионную прочность. Различают способы испытания: метод отрыва; метод ультразвуковой волны [5]; наклонный сдвиг [7]; испытание на сдвиг с двух сторон; испытание на изгиб [11].

Результаты, полученные разными способами, различаются. К примеру, при испытании наклонным сдвигом возникают высокие сжимающие напряжения, создающие дополнительные силы трения.

Заключение

Для обеспечения адгезии бетонного основания к наносимой бетонной ремонтной смеси необходимо соблюдать требования:

1. Грамотно подбирать состав ремонтной бетонной смеси, используя наполнители (заполнители) крупностью зерен до 0,63 мм для улучшения сцепления с бетонным основанием [1, 12]; известняковый наполнитель, гранитный порошок и другие минеральные наполнители в количестве не менее 10 % от массы вяжущего вещества совместно с суперпластификатором, гиперпластификатором, редиспергирующей добавкой в количестве до 2 % от массы вяжущего [4, 5, 10]; фиброволокна из различного материала в оптимальном количестве. При обосновании

экономической выгоды в зависимости от ситуации можно применять углеродные нанотрубки [13, 14].

2. Тщательно готовить бетонное основание для проведения ремонтных и восстановительных работ.

3. Последовательно и корректно выполнять все спроектированные технологические операции.

Библиографический список

1. Коровкин М.О., Короткова А.А., Ерошкина Е.А. Ремонтные сухие строительные смеси для восстановления геометрических характеристик железобетонных конструкций // Образование и наука в современном мире, инновации. 2020. № 5 (30). С. 122–128.

2. Молодин В.В., Леонович С.Н. Сцепление бетона восстановления с коррозионно-деструктированной железобетонной конструкцией // Наука и техника. 2022. № 1. Т. 21. С. 36–41.

3. Толыпина Н.М. К вопросу о взаимодействии цементной матрицы с заполнителями // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 6. С. 81–85.

4. Несветаев Г.В., Осипов В.В. О влиянии редиспергируемых полимерных порошков на модуль упругости и прочности сцепления строительных растворов // Инженерный вестник Дона. 2022. № 7 (91). С. 493–505.

5. Chajec A., Sadowski Ł., Moj M. The adhesive and functional properties of cementitious overlays modified with granite powder // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2021. № 117 (6). URL: https://www.researchgate.net/publication/355103087_The_adhesive_and_functional_properties_of_cementitious_overlays_modified_with_granite_powder (дата обращения: 28.04.2023).

6. Пименов А.Т., Игнатова О.А., Чикмарев П.А. Зависимость адгезии защитного (отделочного) покрытия от свойств материалов слоя основания // Известия вузов. Строительство. 2016. № 4. С. 53–57.

7. Payam Ismael Abdulrahman, Dillshad Khidhir Bzeni. Bond Strength Evaluation of Polymer Modified Cement Mortar Incorporated with Polypropylene Fibers // Case Studies in Construction Materials. 2022. № 17 (4). URL: https://www.researchgate.net/publication/362626708_Bond_Strength_Evaluation_of_Polymer_Modified_Cement_Mortar_Incorporated_with_Polypropylene_Fibers (дата обращения: 29.04.2023).

8. Мелкозернистые торкрет-бетоны с комплексными модификаторами // И.Г. Енджиевская, Н.Г. Василевская, О.В. Гофман, А.Д. Козьмин, В.А. Григорьева // Системы. Методы. Технологии. 2018. № 2 (38). С. 164–169.

9. Уплотнение структуры цементного камня в бетоне за счет эффективного использования композиционного вяжущего / Р.С. Федюк,

А.В. Баранов, Д.В. Хроменок, И.Р. Зеленский, С.В. Ким // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 3. С. 195–206.

10. Тараканов О.В., Белякова Е.А., Кагина А.А. Перспективы применения карбонатных пород в бетонах нового поколения // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 3. С. 87–96.

11. Eethar Thanon Dawood, Mafaz Hani Abdullah. Performance of green RPC containing nanoparticles and reinforced with hybrid fibers used for repairing damaged concrete // Case Studies in Construction Materials. 2020. № 13. URL: https://www.researchgate.net/publication/344060332_Performance_of_green_RPC_containing_nanoparticles_and_reinforced_with_hybrid_fibers_used_for_repairing_damaged_concrete (дата обращения: 29.04.2023).

12. Танг Ван Лам, Булгаков Б.И. Исследование прочности сцепления нового бетонного слоя с поверхностью старого бетона // Вестник МГСУ. 2016. № 4. С. 76–83.

13. Использование наноразмерных добавок в бетонах и строительных растворах для обеспечения адгезии при ремонтных работах / В.Ф. Хританков, А.П. Пичугин, О.Е. Смирнова, А.А. Шаталов, М.А. Пичугин // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т. 17. № 1. С. 131–137.

14. Защитно-отделочные составы и композиции для ремонтных работ и обеспечения долговечности здания / А.П. Пичугин, В.Ф. Хританков, О.Е. Смирнова, Е.Г. Пименов, К.А. Никитенко // Известия вузов. Строительство. 2019. № 9. С. 109–122.

15. Кузьмина В.П. Составы и способы получения сухих строительных смесей // Сухие строительные смеси. 2018. № 5. С. 25–30.

16. Самченко С.В., Макаров Е.М. Образование и рост кристаллов этtringита в присутствии полимерных функциональных добавок // Успехи современной науки и образования. 2016. № 12. Т. 5. С. 118–122.

METHODS OF INCREASING ADHESION BETWEEN REPAIR CONCRETE MIX AND CONCRETE BASE

A.S. Dzhabarov, V.V. Belov

***Abstract.** The article discusses ways to increase adhesion between the repair concrete mixture and the concrete base. It is indicated that the amount of adhesive strength is affected by the age of the repaired base and its treatment before applying the concrete mixture, the type of cement used, the type of fillers, fillers and various modifiers, as well as the conditions under which the applied repair concrete mixture will harden.*

Keywords: adhesion improvement, repair concrete mix, concrete base, adhesive strength.

Об авторах:

ДЖАБАРОВ Амирджон Султонджонович – аспирант кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», Тверь. E-mail: volnik_amir@mail.ru

БЕЛОВ Владимир Владимирович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», Тверь. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

About the authors:

DZHABAROV Amirdzhon Sultondzhonovich – Postgraduate Student of the Department of Building Materials and Structures Production, Tver State Technical University, Tver. E-mail: volnik_amir@mail.ru

BELOV Vladimir Vladimirovich – Advisor to RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures Production, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

УДК 621.928.26

ВАЛКОВАЯ СОРТИРОВКА ДЛЯ ТРУДНОРАЗДЕЛЯЕМЫХ СЫПУЧИХ СМЕСЕЙ

**А.В. Кондратьев, С.М. Кочкян, Ю.Н. Павлов, А.А. Гусаров,
С.П. Смородов, И.М. Гулийев, К.А. Скачков**

**© Кондратьев А.В., Кочкян С.М.,
Павлов Ю.Н., Гусаров А.А.,
Смородов С.П., Гулийев И.М.,
Скачков К.А., 2023**

Аннотация. В статье рассматриваются варианты валковых сортировок для просеивания трудноразделяемых смесей. Анализируются конструктивные схемы разделительных устройств исходя из условий предотвращения заклинивания камней, устранения налипания влажного материала и накручивания волокнистых включений на валы и диски сортировки. Формулируются рекомендации по использованию очистительных средств на сортировке, выполненной по комбинированной схеме.

Ключевые слова: валы, диски, валковая сортировка, камни, волокнистые включения, влажный материал.

Валковая сортировка имеет существенное преимущество перед другим разделительным оборудованием при просеивании трудноразделяемых смесей, содержащих твердые включения, влажный мелкодисперсный материал и волокнистые включения (например, при сепарации каменистой массы на камне- и картофелеуборочных комбайнах, а также на дробильно-сортировочных комплексах дорожно-строительных машин) [1]. Однако такие негативные явления, как заклинивание камней, налипание влажного материала (почвенных частиц, ила и глины) и накручивание волокнистых включений (стеблей растений, корневых остатков) между рабочими элементами устройства, заметно сдерживают применение валковых сортировок на мелиоративной, торфяной, сельскохозяйственной и дорожно-строительной технике [1–3]. Поэтому выбор рациональной конструкции разделительного устройства должен не только основываться на решении перечисленных отрицательных задач, но и исходить из требования наибольшего «живого сечения» просеивающей площади отверстий сита [4]. Только одновременное разрешение вышеуказанных проблем позволит получить надежную и эффективную валковую сортировку. Предварительные исследования показали, что с данной позиции весьма перспективными могут оказаться комбинированные схемы валковых разделителей, сочетающие шахматное расположение дисков на валах с расстановкой дисков встык, при этом форма дисков круглая [5].

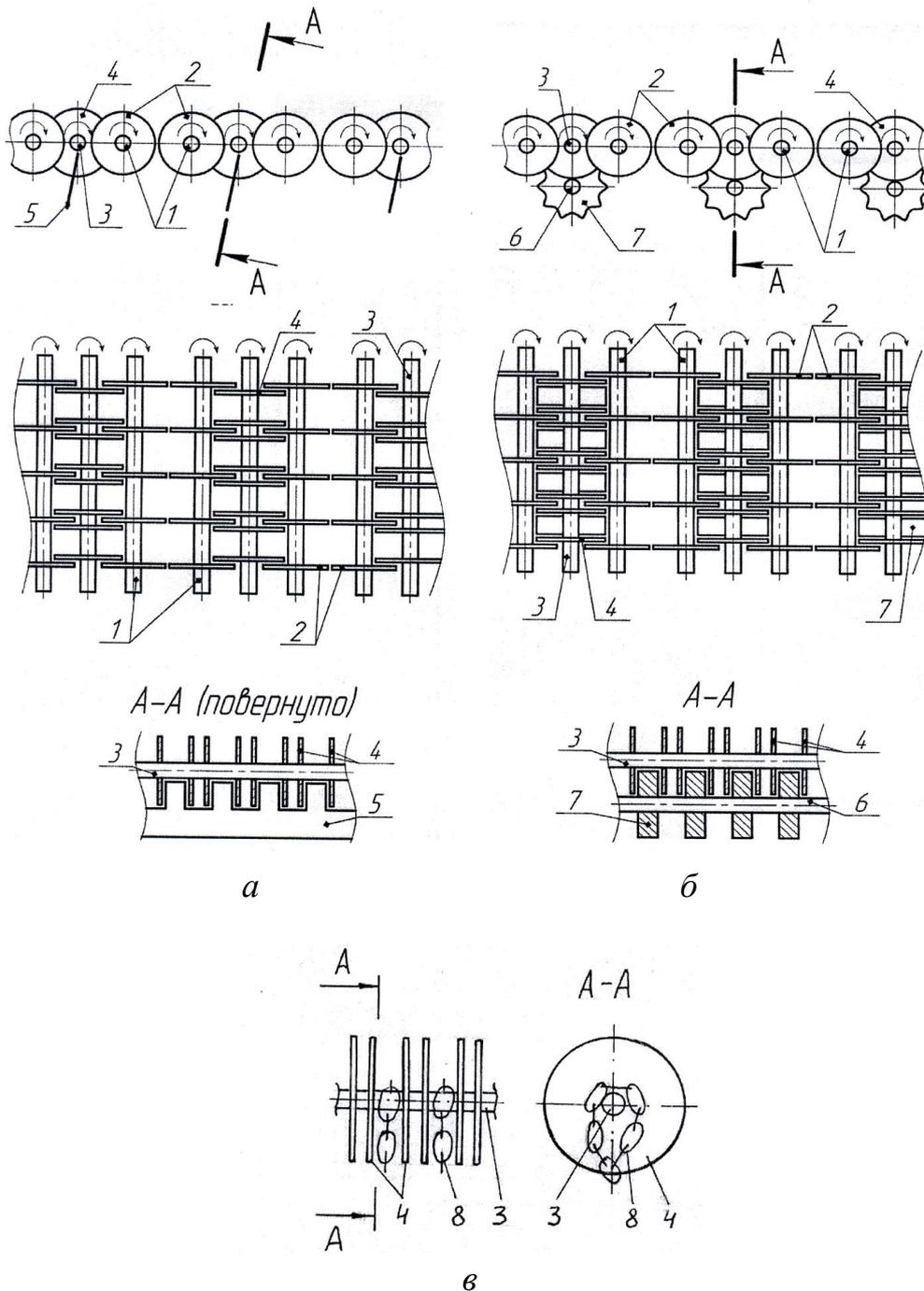
На рисунке представлены схемы валковых сортировок, каждая из которых состоит из набора секций по два вала 1 с установленными на них встык дисками 2 [6]. Между секциями установлен промежуточный вал 3 с дисками 4, которые попарно расположены в пространстве между дисками 2 валов 1 соседних секций. В то же время диски 4 практически вплотную (с зазором) установлены к боковым поверхностям дисков 2 и к валам 1 секций. Под каждым промежуточным валом находится очистительная гребенка 5 (рисунок *а*) или очистительный вал 6 с дисками 7 (рисунок *б*). Зубья гребенки размещены с зазором (почти вплотную) к боковым поверхностям дисков 4 и вала 3 (рисунок *а*). Толщина дисков 7 очистительного вала 6 также выполнена по ширине отверстия между парными дисками 4 с небольшим зазором к их боковым поверхностям и очистительному валу 3 (рисунок *б*).

Предложенные схемы валковых сортировок позволяют предотвращать заклинивание зерен камней между рабочими элементами разделительного устройства (дисками, валами) за счет круглой конфигурации дисков. Одновременно диски 4 промежуточных валов 3 должны обеспечивать очистку дисков 2 и валов 1 секций от налипающего материала и накручивающихся волокнистых включений. Пространство между парными

дисками 4 промежуточных валов 3 очищается зубьями очистительной гребенки (рисунок *а*) или дисками 7 очистительного вала 6 (рисунок *б*). Вместе с тем следует отметить, что при интенсивном прохождении в промежутках между парными дисками 4 материала последний будет прижимать волокнистые компоненты к поверхности вала 3, способствуя тем самым накручиванию растительности. При этом зубья гребенки также могут способствовать накручиванию, прижимая волокнистые включения к валу 3 (рисунок *а*). Кроме того, на зубьях может накапливаться влажный материал, что будет создавать дополнительное сопротивление вращению валов 3. В случае же использования очистительного вала 6 с дисками 7 для освобождения пространства между дисками 4 промежуточного вала 3 можно избежать налипания и накручивания растительности, но в то же время диски 7 очистительного вала 6 будут существенно затемнять «живое сечение» валкового сита, что приведет к замедлению просеивания мелкой фракции разделяемой смеси (рисунок *б*).

С учетом вышеизложенного были проведены дополнительные исследования по нахождению очистительного устройства применительно к промежуточному валу для представленной комбинированной схемы валковой сортировки. В результате аналитических исследований было предложено очистительное устройство в виде цепного кольца 8, свободно посаженного на промежуточный вал 3 между парными дисками 4 (рисунок *в*) [2, 7, 8]. Данное очистительное устройство, свободно вращаясь и на валу 3, будет препятствовать процессам налипания и накручивания компонентов смеси в пространстве между дисками 4, постоянно очищая его и не закрывая при этом просеивающие отверстия валкового сита. В свою очередь колебательные движения звеньев цепи и их проворачивание на валу 3 обеспечивают самоочистку (отряхивание) цепного кольца от налипающего влажного мелкодисперсного материала.

Оценка работоспособности очистительных устройств показала, что цепные кольца наиболее эффективны при высокой интенсивности прохождения материала в отверстиях валкового сита. Поэтому в первой части валковой сортировки по ходу движения материала в пространстве между парными дисками 4 на промежуточном валу 3 следует устанавливать очистительные цепные кольца 8, а на последующих участках сита, где просеивание материала происходит менее интенсивно, можно использовать очистительные гребенки или очистительные валы 6 с дисками 7.



Схемы валковых сортировок: *а* – с очистительной гребенкой; *б* – с очистительным валом; *в* – промежуточный вал с цепными кольцами

Таким образом, предложенная комбинированная схема валковой сортировки для просеивания трудноразделяемых (сложных) смесей обеспечивает надежное и эффективное выполнение процессов разделения компонентов сыпучих смесей. После проведения дополнительных экспериментальных исследований рассмотренную конструкцию валковой сортировки можно рекомендовать к использованию в различных областях промышленности для просеивания сложных смесей.

Библиографический список

1. Кондратьев А.В. Создание высокоэффективных валковых сепараторов торфяных машин и оборудования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.05. Тверь, 1998. 361 с.
2. Кочканян С.М. Обоснование параметров и энергетических характеристик валковых сепараторов торфяных машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.05. Тверь, 1993. 148 с.
3. Павлов Ю.Н. Совершенствование процесса разделения торфяного сырья на валковых сепараторах подготовительных отделений перерабатывающих предприятий: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06. Тверь, 2002. 149 с.
4. Обоснование формы дисков валкового грохота для классификации гравия и щебня / А.В. Кондратьев [и др.] // Саморазвивающаяся среда технического вуза: научные исследования и экспериментальные разработки: материалы VI Всероссийской научно-практической конференции. Тверь: ТвГТУ, 2022. С. 41–47.
5. Устройство для грохочения сыпучих материалов: пат. 184688 Рос. Федерация. № 2018117973 / Кондратьев А.В. [и др.]; заявл. 15.05.2018; опубл. 06.11.2018, Бюл. № 31. 4 с.
6. Валковый сепаратор: пат. 213309 Рос. Федерация. № 2022117124 / Кондратьев А.В. [и др.]; заявл. 23.06.2022; опубл. 07.09.2022, Бюл. № 25. 3 с.
7. Ротационный сепаратор: а.с. 1142012 СССР. № 3518311/30-15 / Мясников А.Б., Цыганов В.И., Кондратьев А.В.; заявл. 07.12.82; опубл. 28.02.1985, Бюл. № 8. 3 с.
8. Ротационный сепаратор: а.с. 1428237 СССР. № 4204010/29-15 / Кондратьев А.В. [и др.]; заявл. 02.03.1987; опубл. 07.10.1988, Бюл. № 37. 3 с.

ROLLER SORTING FOR DIFFICULTLY SEPARATED POWDER MIXTURES

**A.V. Kondratiev, S.M. Kochkanyan, Yu.N. Pavlov, A.A. Gusarov,
S.P. Smorodov, I.M. Guliyev, K.A. Skachkov**

***Abstract.** The article discusses options for roll sorting for screening difficult-to-separate mixtures. The design schemes of separating devices are analyzed from the conditions of preventing jamming of stones, eliminating sticking of wet material and winding fibrous inclusions on shafts and sorting discs. Recommendations are formulated on the use of cleaning agents for sorting performed according to a combined scheme.*

***Keywords:** rolls, disks, roll sorting, stones, fibrous inclusions, wet material.*

Об авторах:

КОНДРАТЬЕВ Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных и дорожных машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: avkondr@ya.ru

КОЧКАНЯН Сейран Микаелович – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных и дорожных машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: s_kochkanyan@mail.ru

ПАВЛОВ Юрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных и дорожных машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: pavlov237@yandex.ru

ГУСАРОВ Андрей Александрович – доцент кафедры информатики и прикладной математики, кафедры строительных и дорожных машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: Gusarov-A-A@yandex.ru

СМОРОДОВ Сергей Петрович – старший преподаватель кафедры строительных и дорожных машин и оборудования, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: ssp.tver@yandex.ru

ГУЛИЙЕВ Ибрагим Мубариз – студент, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: i.g.m.1998@mail.ru

СКАЧКОВ Кирилл Александрович – студент, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: kirill.sckahckov@gmail.com

About the authors:

KONDRATYEV Aleksandr Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction and Road Machines and Equipment, Tver State Technical University, Tver. E-mail: avkondr@ya.ru

KOCHKANYAN Seyran Mikaelovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction and Road Machines and Equipment, Tver State Technical University, Tver. E-mail: s_kochkanyan@mail.ru

PAVLOV Yuri Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction and Road Machines and Equipment, Tver State Technical University, Tver. E-mail: pavlov237@yandex.ru

GUSAROV Andrey Alexandrovich – Associate Professor of the Department of Informatics and Applied Mathematics, the Department of Construction and Road Machines and Equipment, Tver State Technical University, Tver. E-mail: Gusarov-A-A@yandex.ru

SMORODOV Sergey Petrovich – Senior Lecturer of the Department of Construction and Road Machines and Equipment, Tver State Technical University, Tver. E-mail: ssp.tver@yandex.ru

GULIYEV Ibrahim Mubariz – Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: i.g.m.1998@mail.ru

SKACHKOV Kirill Alexandrovich – Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: kirill.sckahckov@gmail.com

УДК 694.1

ДЕФЕКТЫ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

С.А. Кульков, Е.И. Баранова

© Кульков С.А., Баранова Е.И., 2023

***Аннотация.** В статье рассматриваются основные дефекты деревянных конструктивных элементов и возможные способы их устранения с целью улучшения эксплуатационных характеристик зданий из древесины.*

***Ключевые слова:** древесина, зазоры, трещины, межвенцовые соединения, дефекты, сучки, смоляные карманы малоэтажное строительство, деревянные конструкции, профилированный брус, деревянное домостроение.*

Обеспечение качества строительных объектов (в данном случае стеновых конструкций деревянных зданий) включает в себя в том числе производственную стадию изготовления строительных конструкций. Обеспечить необходимый уровень качества производства деревянных конструкций можно только при использовании древесины после ее достаточно глубокой переработки.

В течение нескольких лет проводились натурные исследования состояния строительных объектов, в которых использовались различные конструкционные пиломатериалы, деревянные конструкции. В результате был выявлен ряд дефектов, характерных для данного вида строительства.

Дефекты деревянных конструктивных элементов нередко выявляются в условиях строительной площадки, когда их устранение технически невозможно или экономически нецелесообразно, поэтому для обеспечения требуемого качества необходим ремонт в условиях завода-изготовителя [1]. Строительная площадка, где происходит возведение дома с ограждающими конструкциями из клееного деревянного бруса, представлена на рис. 1.



Рис. 1. Строительная площадка

На рис. 2 показан стеновой брус с разрушенным клеевым соединением, что не соответствует требованиям [2]. Материал с таким дефектом должен быть заменен заводом-изготовителем на аналогичный без дефекта. На рис. 3 представлен зазор в соединении стенового бруса размером до 50 мм.

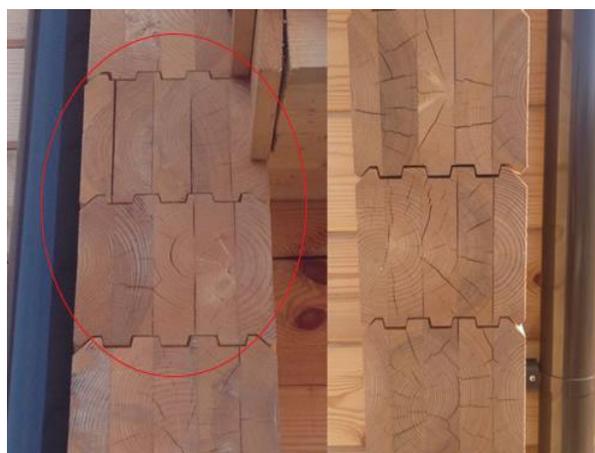


Рис. 2. Разрушение
клеевого соединения



Рис. 3. Зазоры
в соединениях бруса

Указанные зазоры влияют на величину воздухопроницаемости стен здания при эксплуатации и снижают параметры энергоэффективности. При этом в нормативной документации отсутствуют требования к размерам зазоров в межвенцовых соединениях стен зданий из профилированного бруса.

При измерении влажности стенового бруса на строительной площадке были определены значения более 18–20 %, что превышает требования, установленные в [2, 3]. Выявить, что именно стало причиной повышенной влажности (переувлажнение в условиях строительной площадки либо нарушение технологических параметров при производстве) невозможно.

Вышеперечисленные дефекты, возникающие при возведении малоэтажных деревянных домов, типичны для данного вида строительства.

В условиях строительной площадки выявляются дефекты профилирования бруса, которые приводят к значительным неравномерным зазорам и, следовательно, к повышению воздухопроницаемости стен. Устройство ограждающих конструкций и качество деревянных элементов неудовлетворительны (рис. 4). На данном примере выявлены сразу два дефекта: зазоры в пазах стен и грибковое заражение.

Зазоры в пазах стеновых элементов могут быть обусловлены некачественным монтажом или ошибками профилирования, возможен и комбинированный вариант. Такой дефект приводит к продуванию и промерзанию наружных конструкций, геометрическим отклонениям стен, способствует появлению в зазорах насекомых-вредителей, плесени, грибка и гнили. Во избежание возникновения дефекта необходимо на этапе монтажа проверять качество профилирования, а также соблюдать технологию сборки. В противном случае потребуются мероприятия по устранению зазоров – демонтаж и, в случае ошибок профилирования, замена стеновых элементов. Устранение дефекта монтажа выполняют путем стягивания элементов ремнями с рычажным механизмом, увеличением количества нагелей.

Грибковое поражение, в том числе плесень, а также насекомых-вредителей устраняют обработкой древесины биозащитными составами.



Рис. 4. Зазоры в пазах и плесень

Выше были представлены строительные объекты, стеновые конструкции которых выполнены как из клееного бруса, так и из массива. Клееные конструкции – результат глубокой переработки древесины, что предполагает достаточно высокий нормативный уровень качества. При этом достаточно распространенным материалом в деревянном строительстве является брус из цельной древесины. Его доступная цена обусловлена незначительной механической обработкой, а последнее приводит к невысокому качеству данного материала.

На рис. 5 представлены дефекты стенового бруса из цельной древесины в период незаконченных строительного-монтажных работ.



Рис. 5. Дефекты стеновых конструкций

Дефекты бруса, представленного на рис. 5, вызваны трещинами усушки. Вследствие неоднородности свойств древесины усушка древесины в тангенциальном направлении примерно в два раза больше, чем в радиальном. Поскольку усушка древесины начинается с поверхности, в деталях из древесины возникают трещины, имеющие радиальное направление. Образование трещин можно регулировать, устраивая компенсационный пропил. В данном примере компенсационные пропилы отсутствуют. Для устранения такого дефекта используют различные шпатлевки по дереву.

Еще одним распространенным дефектом древесины является сучковатость. По расположению относительно друг друга дефекты могут быть одиночными и разбросанными, групповыми и разветвленными. Кроме того, они могут находиться на одной стороне изделия. По способу выхода выделяют односторонние пороки, выходящие на одну или две смежные стороны, и сквозные, которые проходят сквозь толщу древесины.

По состоянию древесины различают сучки здоровые (светлые и темные), здоровые с трещинами, дефекты с загниванием и гнилые пороки (рис. 6). Табачные сучки представляют собой полностью сгнившую и рыхлую древесину, которую легко растереть в порошок.



Рис. 6. Гнилые сучки на профилированном бруссе [4]

Для строительства зданий выбирают качественную отборную древесину со здоровыми светлыми сучками небольшой длины. Сучки отрицательно влияют на прочность древесины. Степень воздействия определяется количеством сучков, их относительными размерами, расположением (одиночные или групповые, на широкой плоскости или на кромке), связью с окружающей древесиной (здоровые сросшиеся или выпадающие и т. п.). При входном контроле материалов стен из дерева необходимо тщательно осматривать и выявлять детали с гнилыми сучками, если возможно, обменивать на предприятии-изготовителе на аналогичные без данных дефектов. Если такой возможности нет, для устранения дефекта выпадающие, рыхлые, окрашенные и другие сучки в брусках высверливают. Образовавшиеся сквозные отверстия или несквозные углубления заделывают пробками на клею, причем направление волокон пробок должно примерно совпадать с направлением волокон бруса. Затем шпатлюют с помощью специальных составов и шлифуют.

Еще один дефект древесины – смоляные карманы (рис. 7). Данный порок возникает вследствие повреждения камбия, который находится под корой дерева. К этому приводит нагревание отдельных зон ствола ультрафиолетом в мороз. Из-за последующего промораживания нагретых участков и образуются смоляные карманы. На прочностные качества бруса этот дефект практически не влияет, но ухудшает эксплуатационные

характеристики. От температурных воздействий смола из кармана начинает вытекать, что не позволяет качественно окрасить стены и выполнить другие виды отделочных работ. Чтобы избежать проблем со смолой, нужно удалить лишнюю жидкость и заменить шпатлевкой. Перед обработкой смолу удаляют механически и обезжиривают поверхность органическим растворителем. Специальную шпатлевку для используемой породы дерева наносят в полость и на поверхность смоляного кармана.



Рис. 7. Смоляные карманы на брус

По результатам исследования дефектов деревянных конструкций малоэтажных зданий и способов их устранения можно сделать вывод о том, что для обеспечения надлежащего качества строительства необходимо контролировать как технические характеристики деревянных конструкций, так и выполнение строительного-монтажных работ непосредственно на строительной площадке.

При этом анализ современного состояния вопроса в области наличия критериев качества и надежности деревянных конструкций в малоэтажном строительстве показывает, что в специальной литературе практически не уделяется внимания специфике деревянных конструкций, а также проблемам малоэтажных жилых зданий срубной конструкции. В действующих нормативных документах отсутствуют критерии технического уровня, выполнение которых позволит в течение установленного периода эксплуатации поддерживать функциональные характеристики конструкции стены – целостность, сохранение параметров сопротивления теплопередаче, воздухопроницаемости, что является условием долговечности и надежности здания. Данный вопрос требует дальнейшего изучения в связи с необходимостью разработки нормативных требований к производству деревянных конструкций и специалистам в области малоэтажного строительства из древесины.

Библиографический список

1. Кирютина С.Е. Совершенствование технологии и повышение эксплуатационной надежности деревянных стеновых конструкций из клееного бруса: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. СПб., 2017. С. 37–41.
2. ГОСТ Р 56711-2015. Соединения нагельного типа для деревянных конструкций. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293758/4293758312.pdf> (дата обращения: 24.01.2023).
3. СП-516.1325800.2022. Здания из деревянных срубных конструкций. Правила проектирования и строительства. Доступ из справ.-правовой системы «Гарант». Источник: <https://base.garant.ru/404708599/> (дата обращения: 24.01.2023).
4. Территория качества. Профессиональные услуги строительного контроля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://advokat-kachestva.ru/?ysclid=lmymvpr60180521449> (дата обращения: 24.01.2023).

DEFECTS OF WOODEN STRUCTURAL ELEMENTS AND WAYS TO ELIMINATE THEM

S.A. Kulkov, E.I. Baranova

Abstract. The article discusses the main defects of wooden structural elements and possible ways to eliminate them to improve the operational characteristics of wood buildings.

Keywords: wood, gaps, cracks, interstitial joints, defects, knots, resin pockets low-rise construction, wooden structures, profiled timber, wooden house construction.

Об авторах:

КУЛЬКОВ Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: kulkovsa@yandex.ru

БАРАНОВА Елена Ивановна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: elenabaranova787@mail.ru

About the authors:

KULKOV Sergey Alekseevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: kulkovsa@yandex.ru

BARANOVA Elena Ivanovna – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: elenabaranova787@mail.ru

**ПОЛИУРЕТАНОВЫЕ ИНЪЕКЦИОННЫЕ СОСТАВЫ:
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ
С УЧЕТОМ ОПЫТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДРЯДЧИКАМИ**

С.А. Кульков, А.В. Савич, С.Б. Лаптев

© Кульков С.А., Савич А.В., Лаптев С.Б., 2023

***Аннотация.** В статье обосновывается возможность замены импортных полиуретановых составов, используемых для инъекционной гидроизоляции подземных сооружений, отечественными аналогами. При оценке допустимости эквивалентной замены материалов в проектных решениях подчеркивается важность учета практического опыта подрядных организаций по применению этих составов.*

***Ключевые слова:** инъекционные составы, смолоинъекция, инъектирование, инъекционная гидроизоляция, полиуретановые составы, гидроизоляция, полиуретановые смолы, гидроактивные смолы, импортозамещение, материалы-аналоги.*

При устройстве гидроизоляции подземных сооружений в нашей стране начиная с 90-х гг. прошлого века активно применялась инъекция полиуретановых смол [1, 2]. Так, например, в 1998 г. были проведены экспериментальные исследования деформационно-прочностных свойств отечественных полиуретановых композиций производства ООО «Тимп» (г. Владимир), используемых для гидроизоляции тоннелей метрополитенов [3]. Тогда же в г. Санкт-Петербурге научно-производственным предприятием «Спецгидроизоляция “Монолит”» совместно с АО «Метрострой» была разработана Инструкция по гидроизоляции подземных сооружений на объектах метрополитена методом смолоинъекции (ТУ 2226-007-39484066-97) [5]. Параллельно с отечественными технологиями в сфере инъекционной гидроизоляции в последние годы использовались технологии и материалы иностранных производителей, таких как BASF (Германия), Drizoro (Испания), Sika (Швейцария), De Neef (Бельгия) и др.

В связи с тем, что в последнее время многие импортные полиуретановые составы стали недоступны на российском рынке, на стадии разработки рабочей документации зачастую возникает необходимость замены ранее предусмотренных проектными решениями материалов имеющимися российскими аналогами. Эта задача вполне может быть выполнена с использованием составов отечественного производства, часто

даже превосходящих конкурентов по своим технико-экономическим показателям.

С учетом широкого диапазона свойств инъекционных полиуретановых составов, которых позволяет добиться современная технология производства, особенно актуальным стал вопрос правильного подбора материалов-аналогов [4]. В описании физико-химических свойств материалов, предоставляемом производителями, могут быть не даны многие нюансы, влияющие на ход и результаты работ при решении конкретных производственных задач. В качестве примера рассмотрим вязкость инъекционных составов. Низкая вязкость материалов может обеспечить более высокую проникающую способность нагнетаемых полиуретановых составов и увеличить зону их распространения. Многие производители подчеркивают низкую вязкость своих составов как преимущество, причем даже в тех случаях, когда это свойство не требуется. Более того, практика показывает, что те свойства, которые хороши, например, при гидроизоляции слабообводненных волосяных трещин раскрытием до 0,1–0,3 мм, становятся недостатком при наличии интенсивной фильтрации в дефектах большей ширины раскрытия. Например, гидрофобные (т. е. не связывающие воду в процессе полимеризации) двухкомпонентные полиуретановые составы со временем жизни смеси более 30 мин сохраняют высокую подвижность после контакта с водой, поэтому при высокой скорости фильтрации существует риск их вымывания из заполняемого объема. С увеличением же вязкости состава риск вымывания снижается.

На основании обобщения опыта таких подрядчиков, как ООО «Спецгидроизоляция “Монолит”» и ООО «Гидроизол», можно предложить вариант группировки инъекционных полиуретановых составов с точки зрения их взаимозаменяемости при устройстве промышленной гидроизоляции подземных сооружений (таблица) [5].

Инъекционные полиуретановые составы (материалы-аналоги)

Описание группы	Материал	Производитель / торговая марка
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Однокомпонентные гидроактивные полиуретановые гели (600–1 250 мПа·с)	«Тимпанат 101»	ООО «Тимп»
	«Манопур С»	ООО «Гидрозо»
	«Изолит ПУ»	ООО «Полихим Северо-Запад»
	«Apiflex – инъекция S»	ООО «Инновационные технологии»
Однокомпонентные гидроактивные полиуретановые смолы средней и	«Тимпанат 100»	ООО «Тимп»
	«Apiflex – инъекция H»	ООО «Инновационные технологии»

высокой вязкости (400–2 000 мПа·с)	HA Flex LV AF	De Neef
---------------------------------------	---------------	---------

Окончание табл.

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
Однокомпонентные гидроактивные полиуретановые смолы низкой вязкости (100–500 мПа·с)	«Тимпол 112К», «Тимпол 112КМ»	ООО «Тимп»
	«Манопур 2К Флекс»	ООО «Гидрозо»
	MasterRoc MP 355 1K	MBCC Group (BASF до 2020 г. [26])
	HA Flex SLV, HA Cut CFL AF	De Neef (gcp)
Двухкомпонентные полиуретановые смолы со временем жизни рабочей смеси не менее 30 мин (50–150 мПа·с)	«Изолит 2УК»	ООО «Полихим Северо-Запад»
	«Тимпол 111НВ»	ООО «Тимп»
	MC-Injekt 2300 TOP	MC-Bauchemie
	«Манопур 143»	ООО «Гидрозо»
Двухкомпонентные полиуретановые смолы с коротким временем реакции (55–350 мПа·с)	«Тимпол 228 THX»	ООО «Тимп»
	MC Montan Injekt LE	MC-Bauchemie
	MasterRoc MP 355 Thix	MBCC Group (BASF до 2020 г.)
	«Манопур 129 Тикс»	ООО «Гидрозо»

Безусловно, предложенная классификация не является исчерпывающей. Существует определенное количество материалов, в том числе и отечественных, не вошедших в составленную таблицу; тем не менее эффективность перечисленных составов и их взаимозаменяемость подтверждены при решении сходных задач на многочисленных объектах таких Санкт-петербургских компаний, как «Спецгидроизоляция “Монолит”» и «Гидроизол». Среди указанных объектов имеются:

шахтные стволы,
кабельные коллекторы,
очистные сооружения,
поземные переходы и паркинги,
автодорожные тоннели,
тоннели метрополитена.

Один из примеров произведенных работ со значительным процентом использования инъекционных полиуретановых составов – проект капитального ремонта с гидроизоляцией железобетонной обделки Кепшенского тоннеля автодороги Адлер – Красная Поляна, разработанный ООО «Спецгидроизоляция “Монолит”» и успешно реализованный ООО «Гидроизол» в период подготовки к зимней Олимпиаде 2014 г. (рис. 1) [6].



Рис. 1. Капитальный ремонт с гидроизоляцией железобетонной обделки автодорожного тоннеля на магистрали Адлер – Красная Поляна: *а* – подготовка к выполнению работ; *б* – завершение работ, демонтаж временных ограждений

Как пример успешных отечественных разработок материалов в области инъекционной гидроизоляции, превосходящих импортные аналоги, можно отметить двухкомпонентный состав «Тимпол 111/7» с повышенным коэффициентом пенообразования. Он был разработан ООО «Тимп» по заказу ООО «Спецгидроизоляция “Монолит”» для устройства водозащитного барьера во время проходки ЗАО «Управление-15 Метрострой» тоннеля между станциями «Южная» и «Перспект Славы» 5-й линии Санкт-Петербургского метрополитена при входе тоннелепроходческого механизированного комплекса Herrenknecht S-782 в вентиляционную шахту № 627. В дальнейшем этот же состав был успешно применен для инъекционного тампонажа выведенных из эксплуатации водоводов при производстве подводно-технических работ в р. Неве в г. Санкт-Петербурге. Выполнение работ на подводном участке обеспечивалось водолазной бригадой научно-производственного центра «Подводные технологии». Разработанный материал использовался также при ликвидации повышенного водопритока на участке технологической остановки проходческого щита после прохождения акватории Финского залива при сооружении двухпутного тоннеля от станции «Беговая» до станции «Новокрестовская» (рис. 2, 3).



Рис. 2. Нагнетание двухкомпонентного полиуретанового состава «Тимпол 111/7» с увеличенным коэффициентом расширения за тоннельную обделку в зоне работы проходческого щита на участке «станция «Беговая» – станция «Новочеркасская»» (фото автора)



Рис. 3. Общий вид сооружаемого перегонного тоннеля от станции «Беговая» до станции «Новочеркасская» вблизи места производства работ (фото автора)

Производителям работ по промышленной инъекционной гидроизоляции важно поддержать инициативу по созданию перечня взаимозаменяемых полиуретановых инъекционных составов и дополнить его на основании собственного производственного опыта. Наличие подобного документа поможет проектным институтам ориентироваться в многообразии новых инъекционных составов, гарантирует корректность замен импортных материалов на российские аналоги при решении задач импортозамещения, обеспечит доступ к поставкам специализированных составов при проведении торгов тем отечественным производителям, качество продукции которых подтверждено положительным опытом применения на объектах потенциальных подрядчиков.

Библиографический список

1. Дианов В.М., Смирнов Ю.Г., Енютин А.Н. Перспективы химического упрочнения приконтурного массива в скальных горных породах // Разработка мощных месторождений на больших глубинах: сборник научных исследований по совершенствованию технологических процессов подземной разработки мощных рудных месторождений и перспективам развития производственного объединения «Апатит». Апатиты: КНЦ АН СССР, 1983. С. 40–44.

2. Савич А.В. Краткий обзор истории развития отечественных технологий смолоинъекции для гидроизоляции заглубленных железобетонных конструкций зданий // Направления развития российской науки: теоретические исследования и экспериментальные разработки студентов и аспирантов: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Тверь: ТвГТУ, 2021. Т. 1. С. 96–101.

3. Результаты экспериментальных исследований деформационно-прочностных свойств тампонажных полиуретановых композиций, используемых для гидроизоляции тоннелей метрополитенов / Б.Г. Тарасов [и др.] // Подземный город: геотехнология и архитектура: материалы международной конференции. СПб.: СПбГАСУ, 1998. С. 189–194.

4. Савич А.В. Выбор материалов для гидроизоляции подземных сооружений // СтройПРОФИ. 2014. № 5 (21). С. 56–57.

5. Опыт работ по гидроизоляции подземных сооружений / В.М. Дианов [и др.] // Записки Горного института. 2012. № 199. С. 145–149.

6. Строительство дороги Адлер – Красная Поляна в Сочи, тоннелепроходческий комплекс [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://skvadim.livejournal.com/13046.html?ysclid=lmyoouyrp4476477631> (дата обращения: 28.12.2022).

**INJECTABLE POLYURETHANE COMPOUNDS
FOR INDUSTRIAL WATERPROOFING:
CLASSIFICATION TABLE OF SUBSTITUTE MATERIALS
IN CONDITIONS OF IMPORT SUBSTITUTION**

S.A. Kulkov, A.V. Savich, S.B. Laptev

***Abstract.** The article substantiates the possibility of replacing imported polyurethane compounds used for injection waterproofing of underground structures with domestic analogues. When assessing the feasibility of equivalent replacement of materials in design solutions, the importance of taking into account the practical experience of contractors in the use of these compounds is emphasized.*

***Keywords:** injection compounds, resin injection, sealing, polyurethane grouts, waterproofing, polyurethane, polyurethane resins, hydroactive resins, import substitution, substitute materials.*

Об авторах:

КУЛЬКОВ Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: kulkovsa@yandex.ru

САВИЧ Андрей Владиславович – исполнительный директор ООО «Спецгидроизоляция “Монолит”», Санкт-Петербург. E-mail: sawitch@rambler.ru

ЛАПТЕВ Сергей Борисович – директор ООО «Тимп», Владимир.

About the authors:

KULKOV Sergey Alekseevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: kulkovsa@yandex.ru

SAVICH Andrey Vladislavovich – Executive Director of Director of the Limited Liability Company «Special Waterproofing “Monolit”», St. Petersburg. E-mail: sawitch@rambler.ru

LAPTEV Sergey Borisovich – Director of Limited Liability Company «TIMP», Vladimir. E-mail: kulkovsa@yandex.ru

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ И ЖЕСТКОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ФОРМЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СООРУЖЕНИЯ

Н.С. Малетина, С.А. Соколов, А.В. Новиков

© Малетина Н.С., Соколов С.А., Новиков А.В., 2023

Аннотация. В статье рассматривается зависимость вклада инерционных масс в формы собственных колебаний от высоты здания, линейной жесткости сооружения и длины сейсмического блока. Приводятся описания экспериментов, проведенных в программно-вычислительном комплексе для прочностного анализа конструкций методом конечных элементов.

Ключевые слова: сейсмическая нагрузка, формы колебаний, инерционные массы, динамическое нагружение, промышленное здание, землетрясение.

Российская Федерация занимает большую площадь, и на ее территории имеются сейсмоопасные регионы с расчетной интенсивностью землетрясений 7–9 баллов. В настоящее время проектирование и расчет зданий и сооружений выполняются в различных программно-вычислительных комплексах, в которых реализован модульно-спектральный метод расчета сейсмических нагрузок. При этом неправильная трактовка результатов расчета при действии на сооружение динамических нагрузок в указанных комплексах может приводить к ошибкам при проектировании. В связи с этим важно понимать, правильно ли рассчитана конструкция с заданными динамическими нагрузками.

Задачи динамики существенно сложнее задач статики, так как в итоге решается система не алгебраических, а дифференциальных уравнений. В динамике определяются силы, действующие на тело, а также находятся перемещения, скорости, ускорения [1], тогда как статика в большей степени связана с механическими свойствами материалов, из которых состоит тело. При решении задач статики следует знать, что такое сила, как она приложена к телу, на каком расстоянии от тела эта сила находится.

Статические нагрузки – постоянные во времени или такие, которые в процессе нагружения изменяются очень медленно; малыми инерционными силами пренебрегают. Нагрузка, быстро изменяющаяся во времени, побуждает перемещения элементов конструкции с ускорениями, а

возникающие при этом силы инерции необходимо учитывать при расчете зданий и сооружений. Такие нагрузки называются динамическими.

Отличием задач динамики от задач статики является наличие в правой части уравнения равновесия силы инерции, которая приводит к увеличению усилий и перемещений строительных конструкций. Величина dP_u элементарной силы инерции, действующей на бесконечно малый элемент тела, равна произведению его массы dm на ускорение a и направлена в сторону, противоположную ускорению:

$$dP_u = dm \cdot a.$$

В строительстве можно выделить два основных вида динамических нагрузок, обусловленных природными факторами:

1. Пульсационные воздействия ветра. Динамическая составляющая ветровой нагрузки характеризуется наличием пульсации скоростного напора и приводит к колебаниям высотных зданий и сооружений. При динамической составляющей ветрового напора высотные здания и сооружения испытывают колебательные движения под действием сил инерции, возникающих при неравномерном распределении ветровых нагрузок по высоте здания или сооружения. Возникают колебания здания во времени, которые могут иметь постоянный или переменный характер. Последний обусловлен изменением ветрового режима и, как следствие, аэродинамических характеристик здания.

Ветер оказывает влияние на весь комплекс сооружения, включая его конструкцию, конструктивные элементы, строительные материалы, способы крепления конструкций, вид и способ эксплуатации. При проектировании ветровых воздействий следует учитывать их влияние на устойчивость сооружений и зданий, их долговечность и эксплуатационные качества. Поскольку ветровые воздействия характеризуются воздействиями малой пульсационной интенсивностью, они наиболее важны при рассмотрении высотных сооружений, таких как небоскребы и мачты связи.

2. Сейсмическое воздействие. Связано с возникновением землетрясения, приводящего к хаотичным смещениям и колебаниям почвы, которые в свою очередь действуют на фундаменты, вызывая сложные колебания всего сооружения. Подземные толчки могут привести к вибрационным нагрузкам на фундамент здания и его разрушению вследствие этого. Сейсмостойкость зданий оценивается при помощи специальных расчетов, которые позволяют определить степень повреждений и возможность дальнейшей эксплуатации здания. При оценке сейсмической устойчивости здания учитывают силу и характер подземных толчков, их повторяемость, интенсивность и продолжительность воздействия.

Уровень динамической нагрузки при сейсмике значительно выше, чем при ветровой нагрузке, поэтому на ее примере проще отслеживать негативные факторы, влияющие на здания и сооружения.

Рассмотрим воздействие конструктивных особенностей бессвязевых каркасных зданий на результаты динамического расчета сейсмических нагрузок в программно-вычислительном комплексе для прочностного анализа конструкций методом конечных элементов.

Землетрясение есть результат тектонических процессов, протекающих в недрах нашей планеты. В результате землетрясения происходит смещение земной коры, которое можно измерить специальными приборами. Сейсмическими считаются районы, для которых интенсивность землетрясений превышает 7 баллов по шкале MSK-64. В Российской Федерации наиболее сейсмически активными являются районы, примыкающие к Тихому океану, особенно расположенные вдоль Курильской дуги и побережья Охотского моря.

Выделяют три уровня сейсмических воздействий: землетрясения с магнитудой до 7 баллов (ускорение 1 м/с^2), 8 баллов (ускорение 2 м/с^2), 9 и более баллов (ускорение 4 м/с^2).

Существуют и более высокие уровни сейсмического воздействия на территории нашей страны, однако нормами они не регламентируются и требуют разработки специальных технических условий.

В строительных нормах Российской Федерации и в программно-вычислительном комплексе для прочностного анализа конструкций методом конечных элементов реализован модульно-спектральный метод расчета сейсмических нагрузок [2, 3]. Он позволяет имитировать воздействие сейсмической нагрузки на здания и сооружения в соответствии с их фактической конструктивной схемой. Однако использование данного метода при расчете динамических нагрузок имеет серьезный недостаток: соотношение вертикальной погонной жесткости сооружения с жесткостью отдельных конструктивных элементов обуславливает количество инерционных масс, учитываемых при расчете сейсмических нагрузок. В результате при расчете данным методом сооружений, у которых вертикальная погонная жесткость значительно больше жесткости горизонтальных конструкций, можно получить только высокие формы колебаний конструктивной системы зданий при малых периодах и высоких частотах с малой долей инерционных масс, учитываемых в расчете, что не позволяет верно находить сейсмические силы в вертикальных элементах и фундаментах сооружения.

Рассмотрим в качестве модельной задачи одноэтажное промышленное бессвязевое здание с пролетом 24 м. Расчетная схема, разработанная в программно-вычислительном комплексе для прочностного анализа конструкций методом конечных элементов, приведена на рис. 1.

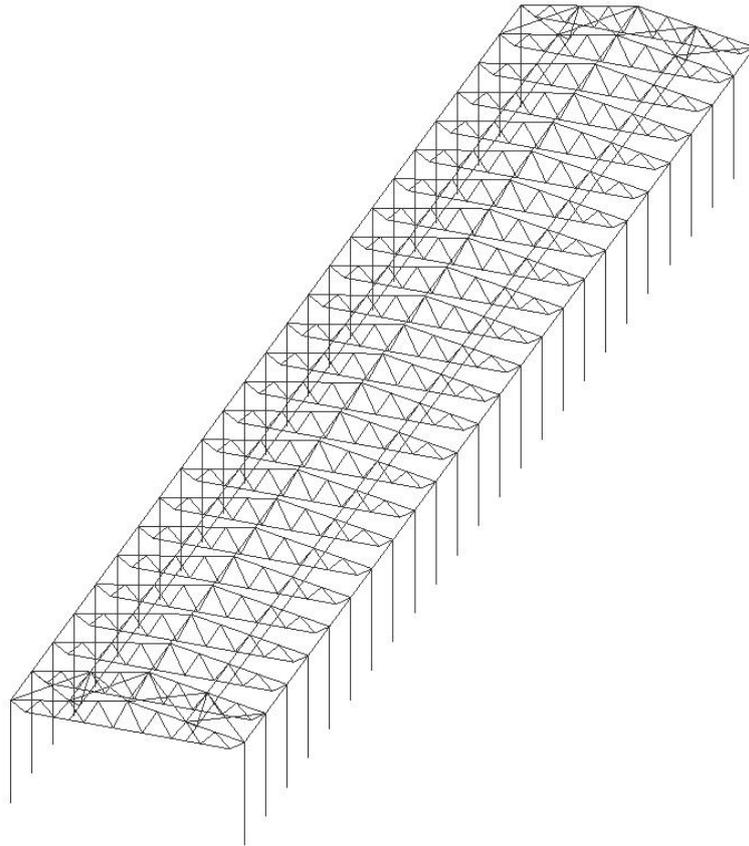


Рис. 1. Расчетная схема,
разработанная в программно-вычислительном комплексе
для прочностного анализа конструкций методом конечных элементов

Определяется вклад количества инерционных масс в первую форму колебаний, которая считается самой опасной, так как для ее реализации требуется наименьшее количество энергии. Как показывает опыт проектирования в сейсмических районах, правильным является отклик конструктивной системы на динамическое воздействие в том случае, если в первой форме колебаний в направлении одной из главных осей инерции системы участвуют 90 и более процентов инерционных масс [2].

Для рассмотренной выше задачи были выполнены следующие расчеты: схема была загружена минимально необходимыми нагрузками – это собственный вес, вес покрытия, снеговая нагрузка. Затем была приложена сейсмическая нагрузка магнитудой 7 баллов. Максимальная высота колонн для здания была рассчитана исходя из предельной гибкости и составила 11 м, сечение колонн принято 500х500 мм. Постепенно, уменьшая высоту колонн на 0,5 м, получили предельную высоту, при которой из-за большой вертикальной погонной жесткости горизонтальные колебания сооружения невозможны.

Из-за большой длины сооружения, превышающей предельную длину сейсмоблока для данного типа сооружений, программно-вычислительный комплекс для прочностного анализа конструкций методом конечных элементов «раскидывает» первую форму колебаний на вторую и четвертую формы (рис. 2) [2]. В связи с этим необходимо сложить получившиеся инерционные массы и принять их в первой форме колебаний.

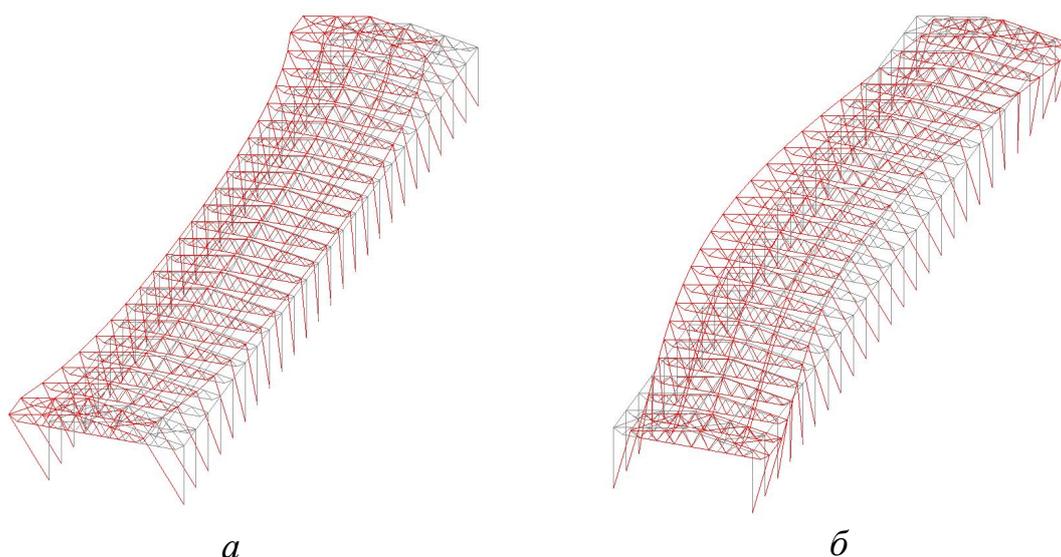


Рис. 2. Форма колебаний: *а* – вторая; *б* – четвертая

Полученные в результате параметры динамического отклика сооружения в зависимости от его высоты и уровня сейсмической нагрузки представлены в табл. 1–3.

Таблица 1

Параметры динамического отклика сооружения
при сейсмической нагрузке 7 баллов,
сечении колонн 500х500 мм

Высота, м	Вторая форма	Четвертая форма	Всего
7,5	66,86	33,1	99,96
8	45,16	49,7	94,86
8,5	50,25	47,34	97,59
9	52,86	44,95	97,81
9,5	55,41	42,63	98,04
10	57,89	40,34	98,23
10,5	60,31	38,09	98,4

11	62,66	35,9	98,56
----	-------	------	-------

Таблица 2

Параметры динамического отклика сооружения
при сейсмической нагрузке 8 баллов,
сечении колонн 500х500 мм

Высота, м	Вторая форма	Четвертая форма	Всего
7,5	66,86	33,1	99,96
8	45,16	49,7	94,86
8,5	50,25	47,34	97,59
9	52,86	44,95	97,81
9,5	55,41	42,63	98,04
10	57,89	40,34	98,23
10,5	60,31	38,09	98,4
11	62,66	35,9	98,56

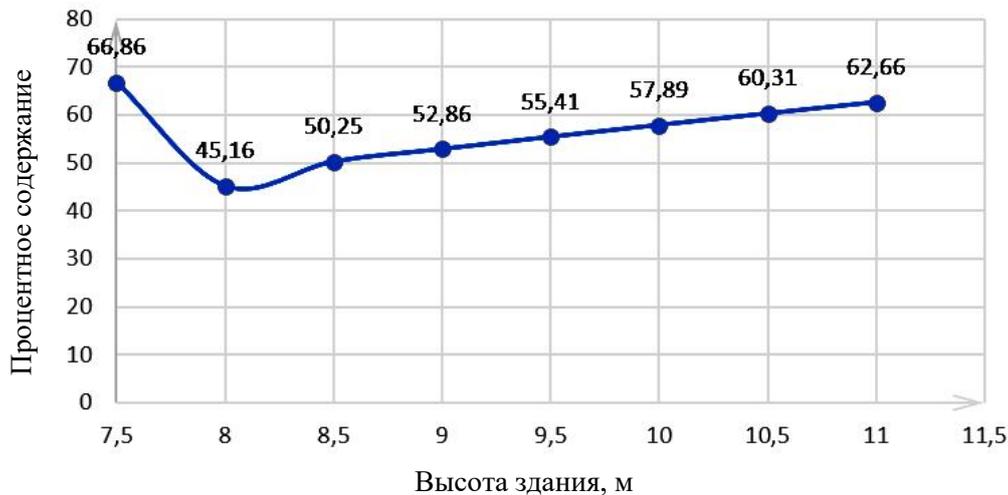
Таблица 3

Параметры динамического отклика сооружения
при сейсмической нагрузке 9 баллов,
сечении колонн 500х500 мм

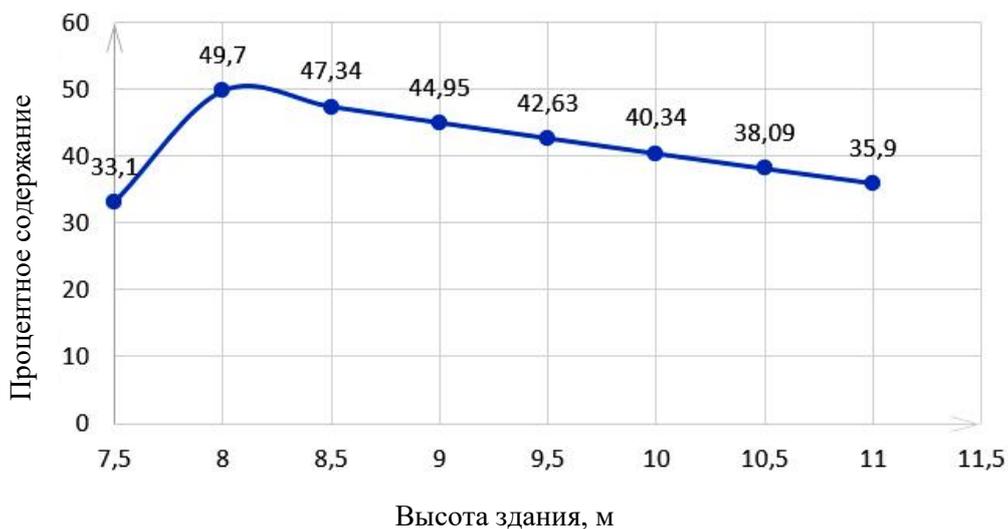
Высота, м	Вторая форма	Четвертая форма	Всего
7,5	66,86	33,1	99,96
8	45,16	49,7	94,86
8,5	50,25	47,34	97,59
9	52,86	44,95	97,81
9,5	55,41	42,63	98,04
10	57,89	40,34	98,23
10,5	60,31	38,09	98,4
11	62,66	35,9	98,56

Как видно из представленных данных, уровень сейсмической нагрузки при одних и тех же жесткостных параметрах конструктивной системы здания не влияет на параметры динамического отклика сооружения (в отличие от вертикальной погонной жесткости, которая приводит к значительному перераспределению инерционных масс между формами). Однако суммарная масса по двум представленным формам превышает 90 %, что соответствует нормальному отклику конструктивной системы на динамическое воздействие. При высоте указанного сооружения менее 7,5 м получить горизонтальные колебания системы модально-спектральным методом не представляется возможным, т. е. данный метод при расчете подобных сооружений малой высоты не применим.

Графики зависимости вклада инерционных масс от высоты здания представлены на рис. 3.



а

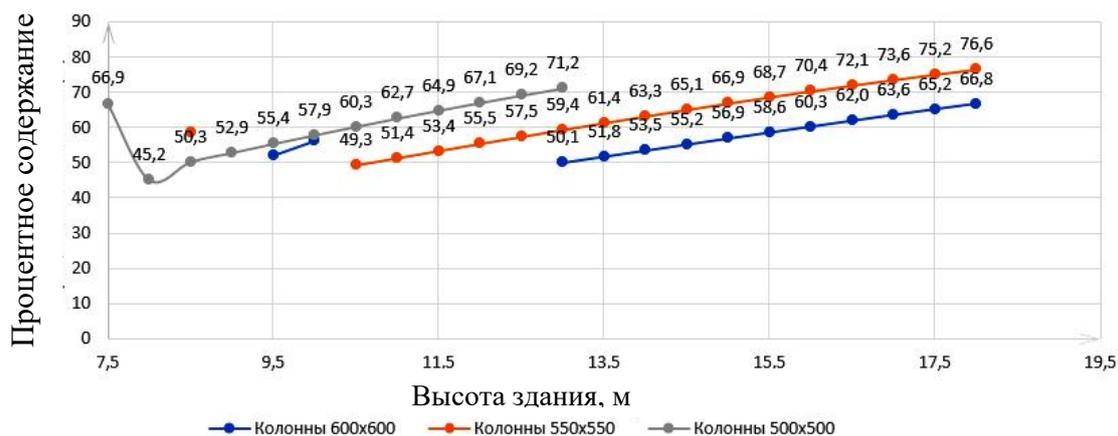


б

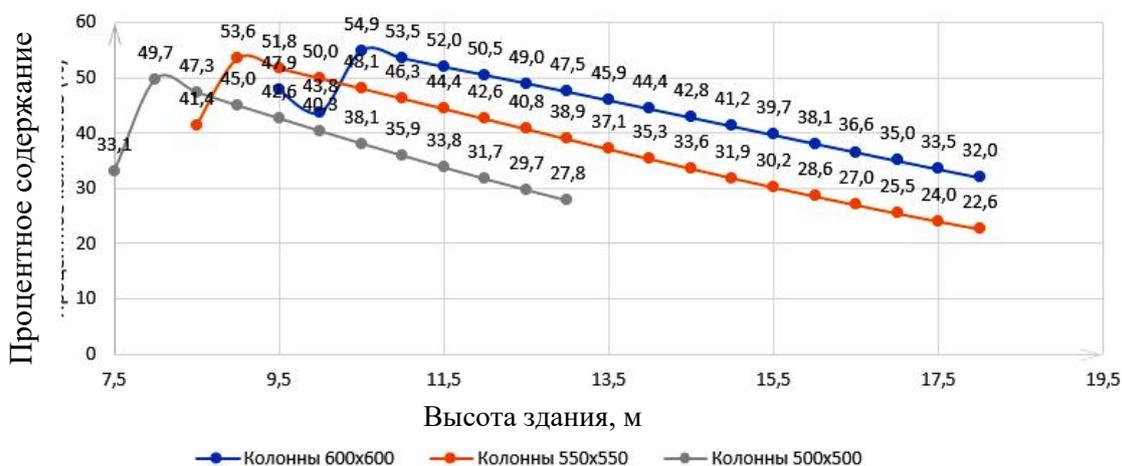
Рис. 3. Графики зависимости инерционных масс от высоты здания H , м, для формы колебаний: a – второй; b – четвертой

Как видно из приведенных графиков, пограничной высотой применения модально-спектрального метода при расчете подобных сооружений является высота 8 м.

Посмотрим, каково влияние вклада инерционных масс в формы колебаний при изменении линейной жесткости вертикальных конструкций сооружения. Были смоделированы схемы с колоннами сечениями 500×500 , 550×550 , 600×600 мм, приложена сейсмическая нагрузка 9 баллов и получены графики зависимости (рис. 4).



а



б

Рис. 4. Графики зависимости инерционных масс от высоты здания H , м, и сечения колонн для формы колебаний: а – второй; б – четвертой

Из приведенных данных видно, что для применения модально-спектрального метода при динамическом расчете на действие сейсмических нагрузок сооружений подобного типа минимальными высотами являются:

- 8 м для колонны сечением 500×500 ;
- 10,5 м для колонны сечением 550×550 ;
- 13 м для колонны сечением 600×600 .

Проверим воздействие длины сейсмического блока на распределение инерционных масс. Возьмем каркас длиной 24 м с колоннами высотой 11,5 м и сечением 500×500 мм, приложим сейсмическую нагрузку в 9 баллов. Постепенно начнем увеличивать длину сейсмического блока здания и построим графики, приведенные на рис. 8, 9.

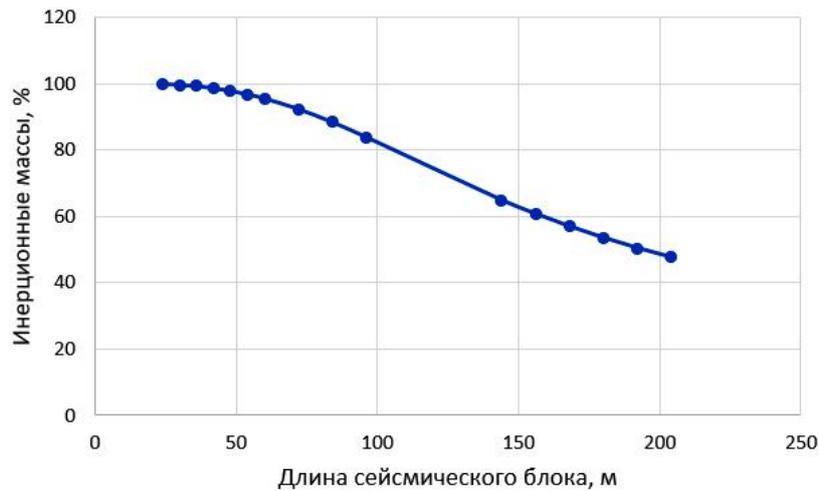


Рис. 8. График зависимости инерционных масс во второй форме колебаний от длины сейсмического блока здания

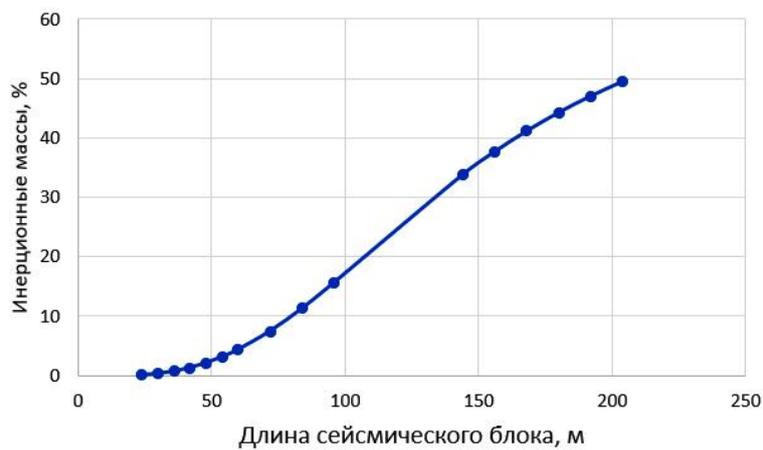


Рис. 9. График зависимости инерционных масс в четвертой форме колебаний от длины сейсмического блока здания

Видно, что влияние длины сейсмического блока при заданном уровне сейсмической нагрузки на распределение инерционных масс по формам колебаний практически исчерпывается при длине блока менее 30 м; при длине менее 60 м такое перераспределение не превышает 5 %, что соответствует установленным требованиям [2].

Выводы:

1. Уровень сейсмической нагрузки при одних и тех же жесткостных параметрах конструктивной системы здания не влияет на параметры динамического отклика сооружения.

2. Минимальная высота для применения модально-спектрального метода при динамическом расчете сооружений рассматриваемого типа на

действие сейсмических нагрузок составляет 8; 10,5 и 13 м для колонн сечением 500×500, 550×550 и 600×600 соответственно.

3. Влияние длины сейсмического блока при уровне сейсмической нагрузки в 9 баллов на распределение инерционных масс по формам колебаний практически исчерпывается при длине блока менее 30 м; при длине менее 60 м данное перераспределение не превышает 5 %.

Библиографический список

1. Зубчанинов В.Г. Лекции по механике деформируемого твердого тела: в 3 ч. Тверь: ТвепИИ, 1993. Ч. 2. 164 с.

2. СП 14.13330.2018 Строительство в сейсмических районах. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/550565571> (дата обращения: 18.04.2023).

3. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Изд. 4-е, перераб. М.: СКАД СОФТ, 2011. 736 с.

STUDY OF THE INFLUENCE OF SEISMIC LOAD AND STIFFNESS PARAMETERS ON THE FORMS OF NATURAL VIBRATIONS OF THE STRUCTURE

N.S. Maletina, S.A. Sokolov, A.V. Novikov

***Abstract.** The article considers the dependence of the contribution of inertial masses to the forms of natural oscillations on the height of the building, on the linear rigidity of the structure and on the length of the seismic block. The descriptions of experiments carried out in a software and computing complex for the strength analysis of structures by the finite element method are given.*

***Keywords:** seismic load, waveforms, inertial masses dynamic loading, industrial building, earthquake.*

Об авторах:

МАЛЕТИНА Наталья Сергеевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: malet.nat@yandex.ru

СОКОЛОВ Сергей Александрович – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: gek.tver@mail.ru

НОВИКОВ Алексей Витальевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: lehand1423@gmail.com

About the authors:

MALETINA Natalia Sergeevna – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: malet.nat@yandex.ru

SOKOLOV Sergey Aleksandrovich – Candidate of Technical Sciences, Tver State Technical University, Tver. E-mail: gek.tver@mail.ru

NOVIKOV Alexey Vitalievich – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: lehand1423@gmail.com

УДК 624.014.2

ОСОБЕННОСТИ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ

А.В. Новиков, С.А. Соколов, Г.С. Тырин, Н.С. Малетина

© Новиков А.В., Соколов С.А.,
Тырин Г.С., Малетина Н.С., 2023

Аннотация. В статье представлен обзор различных конструктивных решений металлических балочных конструкций покрытия производственного здания с различными типами стенки: сплошной типа «Канск», гибкой, гофрированной типа «Алма-Ата».

Ключевые слова: балка типа «Канск», балка с гибкой стенкой, балка с гофрированной стенкой типа «Алма-Ата».

В наше время металлические конструкции применяются во всех видах зданий и сооружений даже при значительных пролетах, высотах и нагрузках. Это обусловлено легкостью таких конструкций, позволяющей снизить общую массу здания в 3–4 раза по сравнению с сооружениями из железобетона, их удобно транспортировать, они легко монтируются. Кроме того, в силу перечисленных особенностей металлических конструкций их использование обеспечивает сокращение сроков проектирования и строительства объекта.

Кровли на основе профилированного настила и эффективного утеплителя, подобранного на основании теплотехнического расчета согласно климатическому району возводимого объекта, предопределили создание новых серийных конструкций покрытия одноэтажных промышленных зданий. Отличительной чертой таких конструкций является их комплектная поставка, обеспечивающая быстрый монтаж элементов каркаса. Для того чтобы повысить уровень индустриальности строительства, максимально сократить сроки проектирования и возведения промышленного

объекта, была проделана трудоемкая работа по типизации проектных объемно-планировочных и технологических решений конструкций [1].

Такие типы комплектной поставки, как «Канск» и «Алма-Ата», широко охватывают здания целевого назначения – физкультурно-оздоровительные, складские, производственные и др. Наряду с ними набирают популярность балочные покрытия с гибкой стенкой.

Конструкции покрытия типа «Канск» выполнены из прокатных широкополочных и сварных тонкостенных двутавровых балок (рис. 1).



Рис. 1. Конструкции типа «Канск» [5]

Отличает указанные балки от балок с гибкой стенкой условная гибкость стенки $\overline{\lambda}_w$, принимаемая равной 3,2 с учетом односторонних поясных швов. Высоту сечения двутавровых тонкостенных балок принимают из строительной, оптимальной и минимальной по наименьшей из этих высот, при этом должны выполняться условия прочности и устойчивости. В соответствии с условиями работы (не работает в закритических стадиях) потеря устойчивости стенки приведет к полной потере работоспособности данной конструкции. Однако запас прочности при этом намного выше, что снижает потребность в более дорогих и прочных сталях [3].

Рассмотрим балочные конструкции покрытия балки с гибкой стенкой (рис. 2).

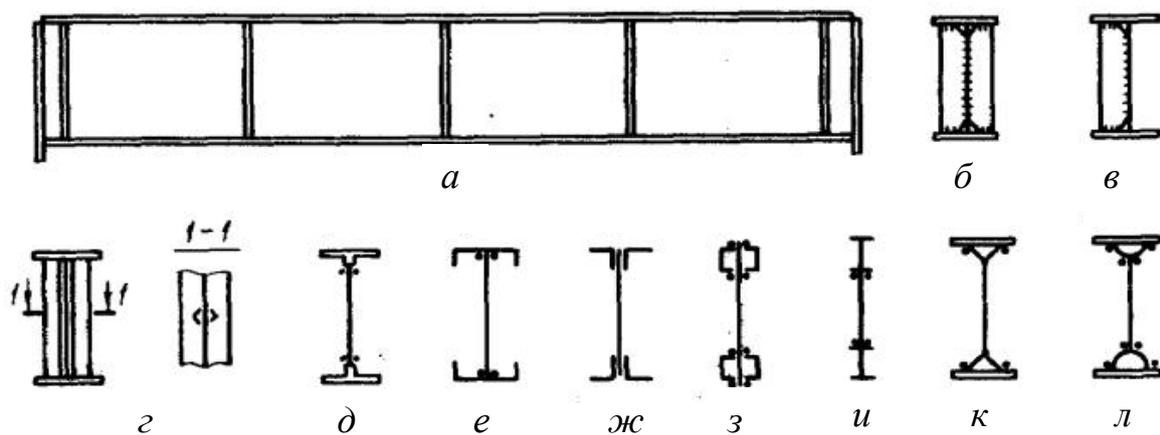


Рис. 2. Балки с гибкой стенкой:

- а* – общий вид балки; *б* – двусторонние поперечные ребра;
в – одностороннее ребро; *г* – бесконтактные ребра;
д – сечение балки с прокатными таврами; *е* – с прокатными
и гнутыми швеллерами; *ж* – с уголками; *и* – с коробчатыми поясами
из швеллера; *к* – с двутаврами; *л* – замкнутое с уголками сечение;
м – замкнутое с половинками на круглые трубы [2]

Особенностью рассматриваемых балок является то, что толщина их стенок меньше в 2–3 раза, чем у обычных сварных, и в 4–6 раз по сравнению с прокатными. Это позволяет экономить металл, расходуемый на стенки. При этом сама стенка работает после потери местной устойчивости, если остается гибкой, т. е. гибкость стенки в таких балках достигает 250–500. Данные балки могут быть разработаны в качестве прогонов, стропильных и подстропильных конструкций пролетом 12–36 м. Условная гибкость стенки, в отличие от других типов балок, принимается в интервале $6 \leq \bar{\lambda}_w \leq 13$ [2].

После потери устойчивости стенки работа балки переходит в закритическую стадию с образованием «хлопунов», когда происходит перераспределение усилий между поясами и стенкой. Для сопротивления местному изгибу пояса в таких балках выполняют, как правило, из листа, прокатного тавра, двутавра или швеллера, а при больших нагрузках – из двутавров. Для повышения жесткости в местах опирания второстепенных балок балки с гибкой стенкой устраивают с поперечными ребрами, двусторонними и односторонними ребрами жесткости, приваренными к стенке. Такие балки изготавливают из высокопрочной стали, поскольку в закритической стадии работоспособность зависит от предела текучести, напрямую обусловленного маркой стали. В ходе исследований продемонстрировали, что благодаря закритической стадии работы, при условии, что марка стали в балках будет одинаковой, в двутавровых балках с гибкой стенкой долю расхода металла можно снизить на 10–15 %. Тем самым они

составят конкуренцию фермам, при этом их высота будет в 1,5–2 раза меньше [4].

Конструкции покрытия типа «Алма-Ата» представляют собой сечения из двутавров с тонкими гофрированными стенами (рис. 3).



Рис. 3. Конструкции типа «Алма-Ата» [6]

Главное отличие балок с гофрированной стенкой от балок с гибкой стенкой заключается в форме самой стенки. Из разных форм металлопроката получают различные виды гофрированного листа (рис. 4).

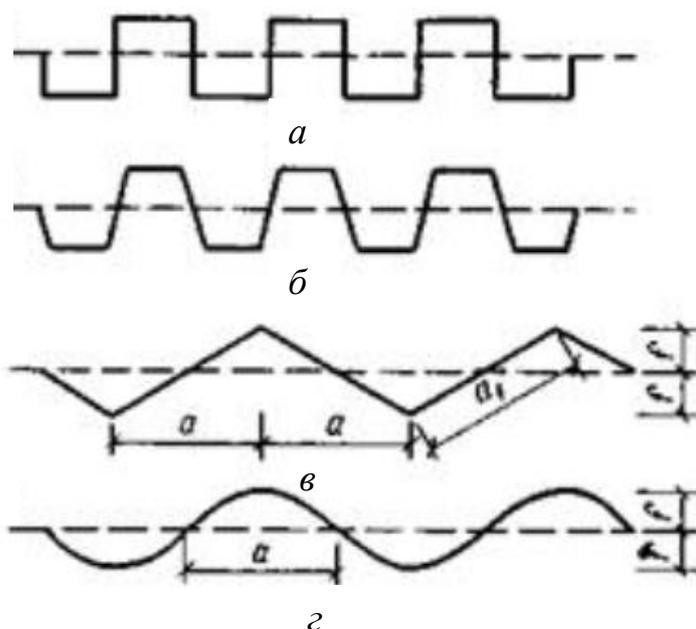


Рис. 4. Гофрирование стенок: *a* – прямоугольное; *б* – трапецидальное; *в* – треугольное; *г* – волнистое [7]

Можно отметить, что указанные формы стенки позволяют увеличить гибкость стенки до 300–600, вследствие чего условная гибкость возрастает: $7 \leq \bar{\lambda}_w \leq 15$. При этом гофрированная стенка не нуждается в дополнительных ребрах жесткости, роль которых выполняют изгибы листа. Поперек волн гофры практически нет напряжений, из-за чего влияние изгибающего момента в плоскости стенки отсутствует. Это обстоятельство позволяет уменьшить нагрузку на пояса и тем самым дополнительно снизить расход металла на 15 %.

Из серьезных недостатков балок с гофрированной стенкой стоит отметить большой прогиб при большепролетных конструкциях. Для уменьшения данного эффекта используют комбинированные стенки (рис. 5). Вторым недостатком связан с невозможностью изготовления таких балок в условиях стройки. Необходима точность процесса, что влечет дополнительные затраты.

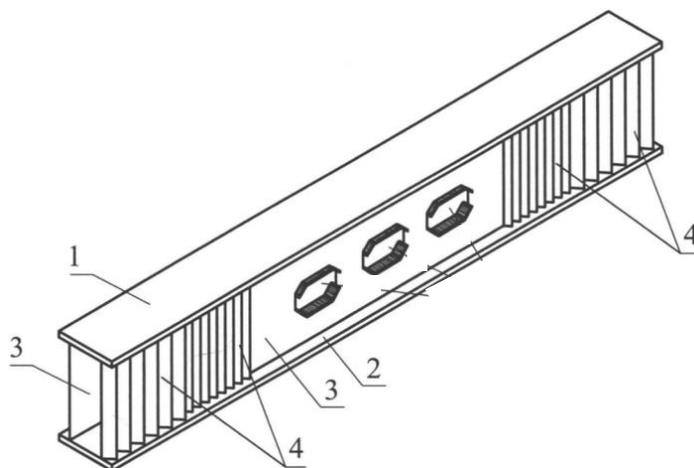


Рис. 5. Устройство комбинированных стенок [7]: 1 – сжатый пояс; 2 – растянутый пояс; 3 – опорное ребро; 4 – гофрированная стенка

Сравнивая разные виды конструкций, следует отметить, что при детальном рассмотрении все конструкции имеют свои плюсы и минусы, поэтому при выборе необходимо исходить из конкретных потребностей. Так, конструкция типа «Канск», имеющая наибольший запас прочности при малой гибкости, при потере устойчивости полностью утрачивает работоспособность. Стоит учитывать и высокий расход материала для данного типа конструкций.

Для балок с гибкой стенкой потеря устойчивости не является критической. При работе в закритической стадии меняются условия работы и на потерю работоспособности воздействуют уже характеристики металла. Поэтому необходимы более высокие марки сталей, что, несомненно, увеличивает стоимость объекта, однако расход материала в таких конструкциях существенно ниже.

В конструкции типа «Алма-Ата» используются гофрированные стенки балок, позволяющие дополнительно снизить расход материала благодаря уменьшению толщины стенок. При этом в силу особенностей строения гофрированного листа увеличивается и гибкость, причем без потери устойчивости. Особенности металлопроката позволяют избежать изгибающего момента в плоскости стенки, что снижает нагрузку на пояса. Главными же недостатками такой конструкции являются большой прогиб конструкции при больших пролетах и невозможность ее изготовления в условиях строительной площадки.

Библиографический список

1. Металлические конструкции: в 3 т. Т. 2. Стальные конструкции зданий и сооружений (Справочник проектировщика) / под общ. ред. заслуж. строителя РФ, лауреата госуд. премии СССР В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова). М.: АСВ, 1998. 512 с.

2. Проектирование металлических конструкций: спец. курс: учебное пособие для вузов по специальности «Промышленное и гражданское строительство» / В.В. Бирюлев, И.И. Кошин, И.И. Крылов, А.В. Сильвестров; под общ. ред. В.В. Бирюлева. Л.: Стройиздат, 1990. 431 с.

3. Металлические конструкции: учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования, обучающихся по направлению «Строительство» / Ю.И. Кудишин [и др.]; под ред. Ю.И. Кудишина. 13-е изд., испр. М.: Академия, 2011. 680 с.

4. Металлические конструкции: учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Промышленное и гражданское строительство»: в 3 т. / В.В. Горев [и др.]; под ред. В.В. Горева. 3-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2004. Т. 1. Элементы конструкций. 551 с.

5. Ростехсталь. Балка 50 09Г2С СТО АСЧМ 20-93 нормальная [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.rostechsteel-nsk.ru/goods/207155294-balka_50_09g2s_sto_aschm_20_93_normalnaya/ (дата обращения: 27.02.2023).

6. Steelbuildings News [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.steelbuildings.ru/Byzov/&thisy=2011&thism=07&thisd=18/> (дата обращения: 27.02.2023).

7. Единый депозитарий РИД для юридических лиц [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://edrid.ru/en/rid/216.013.3487.html/> (дата обращения: 27.02.2023).

FEATURES OF LIGHT METAL BEAM STRUCTURES OF THE COATING OF THE INDUSTRIAL BUILDING

A.V. Novikov, S.A. Sokolov, G.S. Tyrin, N.S. Maletina

***Abstract.** The article presents an overview of various structural solutions of metal beam structures covering industrial buildings with different types of walls: solid type «Kansk», flexible, corrugated type «Alma-Ata».*

***Keywords:** Kansk type beam, flexible wall beam, Alma-Ata type corrugated wall beam.*

Об авторах:

НОВИКОВ Алексей Витальевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: lehand1423@gmail.com

СОКОЛОВ Сергей Александрович – кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: gek.tver@mail.ru

ТЫРИН Георгий Сергеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: tyrin.goha@mail.ru

МАЛЕТИНА Наталья Сергеевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: malet.nat@yandex.ru

About the authors:

NOVIKOV Aleksey Vitalievich – Master`s Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: lehand1423@gmail.com

SOKOLOV Sergey Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Tver State Technical University, Tver. E-mail: gek.tver@mail.ru

TYRIN Georgy Sergeevich – Master`s Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: tyrin.goha@mail.ru

MALETINA Natalya Sergeevna – Master`s Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: malet.nat@yandex.ru

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ТЯЖЕЛЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ ПОЛИДИСПЕРСНОГО ВЯЖУЩЕГО ДЛЯ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Е.В. Ткач, Ю.С. Филимонова, А.Ф. Бурьянов

© Ткач Е.В., Филимонова Ю.С., Бурьянов А.Ф., 2023

Аннотация. Исследовано влияние трехуровневого дисперсного состава клинкерного компонента цементных частиц на снижение межчастичной пустотности и повышение прочности цементного камня. Полученный на основе полидисперсного вяжущего модифицированный бетон характеризуется повышением прочности на сжатие до 59,68 МПа, растяжением при изгибе 6,73 МПа и снижением водопоглощения до 2,43 % в сравнении с контрольным составом. Полученные эксплуатационные показатели позволяют рекомендовать его для производства строительных изделий и конструкций, работающих в суровых условиях эксплуатации (в частности, для лотков оросительных систем).

Ключевые слова: модифицированный бетон, дисперсный состав клинкерного компонента, полидисперсное вяжущее.

ВВЕДЕНИЕ

К бетонам, применяемым в гидромелиоративном строительстве, предъявляются высокие требования по долговечности, которая определяется прежде всего их прочностью и водонепроницаемостью [1]. Основным направлением решения данного типа задач является обеспечение высокой плотности структуры бетона, рационально сочетающего необходимые технологические и эксплуатационные характеристики, путем использования вяжущих веществ высокого качества и комплексных модификаторов [2–3]. В частности, применяемые полидисперсные минеральные компоненты [4–6] позволяют добиться высокой плотности упаковки исходных частиц в каждом микрообъеме материала [7], а также пластификаторов и полимерных модификаторов, изменяющих структуру и свойства материала.

Перспективным видится направление по разработке и реализации эффективных мер по усилению и защите железобетона материалами с повышенной степенью сопротивляемости агрессивным факторам окружающей среды (например, полимерными композициями) [8, 9]. Полимербетоны не нашли еще широкого распространения из-за их дефицитности и высокой стоимости, и основным строительным материалом при возведении мелиоративных сооружений остаются бетон и железобетон.

Таким образом, получение бетонов для гидромелиоративного строительства с высокими эксплуатационными свойствами путем модифици-

рования его структуры и свойств комплексными добавками [10–14] с каждым годом становится все более актуальным.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Свойства и структура модифицированного бетона изучались с использованием следующих материалов. В качестве вяжущего применяли портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н (ГОСТ 31108-2016); мелким заполнителем служил природный песок с модулем крупности 2,5 (ГОСТ 8736-2014), крупным заполнителем – гранитный щебень. Для регулирования свойств бетонной смеси и полученного на ее основе материала вводили комплексную химическую добавку: суперпластификатор Melflux 5581 F на основе эфира поликарбоксилата (ГОСТ 24211-2008) в сочетании с водорастворимой полимерной добавкой «Полидон-А» (ТУ 9365-002-46270704-2001) и дисперсно армирующей добавкой – рубленым базальтовым волокном (ТУ 5952-002-13307094-08). Проведен подбор предварительного состава тяжелой бетонной смеси с целью определения оптимального расхода исходных материалов на 1 м³ этой смеси, при котором обеспечивается важное условие: выдерживаются заданные физико-механические, гидрофизические характеристики и эксплуатационные свойства проектируемого бетона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении исследования с целью упорядочения структуры разномодальнодисперсного вяжущего за счет выбора оптимальной дисперсности и создания тонкодисперсных фракций клинкерного компонента было предусмотрено определение различных фракций указанного компонента, обеспечивающих максимальную плотность упаковки используемых цементных частиц. Исследование проводилось с тремя фракциями: грубой (удельная поверхность 1 200–1 500 см²/г) и средней дисперсности, превышающей дисперсность грубой фракции на 1 500 см²/г; высокодисперсной, гарантирующей заполнение оставшихся в образовавшейся структуре пустот.

При различной дисперсности двух клинкерных составляющих возможна реализация различных схем упаковок частиц относительно исходной (рис. 1).

При введении частиц размера крупнее оптимального (рис. 1б) будет происходить раздвижка зерен, сопровождающаяся увеличением пустотности цементной системы, вследствие чего на ранней стадии темп ее твердения будет снижаться, а на поздних сроках твердения система будет обладать более низкой прочностью.

В случае если размер частиц меньше оптимального (рис. 1б), объем пустот уменьшается относительно упаковки исходных частиц (рис. 1а), но в меньшей степени, чем при оптимальной схеме (рис. 1в). Твердение

цементной системы на ранней стадии также будет происходить медленнее, чем по третьей схеме.

Исходная упаковка грубых частиц клинкера не нарушается, а ее пустотность минимальна (рис. 1*в*). Вяжущее с таким дисперсным составом будет характеризоваться минимальной нормальной густотой, высоким темпом роста прочности как на ранней стадии твердения, так и в поздние сроки.

На основании вышеизложенного в дальнейших исследованиях была принята третья (оптимальная) схема упаковки с разностью удельных поверхностей фракций, равной $1\ 500\ \text{см}^2/\text{г}$, что является первым уровнем упаковки двух фракций клинкерного составляющего. Грубая фракция клинкера с удельной поверхностью $1\ 200\ \text{см}^2/\text{г}$ (первый уровень) принималась с учетом обеспечения запаса клинкерного фонда, способствующего восстановлению бетона в поздние сроки твердения при его эксплуатации (при значительных дефектах структуры возникал эффект «самозалечивания») (рис. 1*в*).

Тонкая фракция с удельной поверхностью $2\ 700\ \text{см}^2/\text{г}$ (второй уровень) принимается с учетом максимального заполнения пустот грубодисперсной составляющей, которая должна обеспечить твердение цементной системы на ранней стадии (рис. 1*а*).

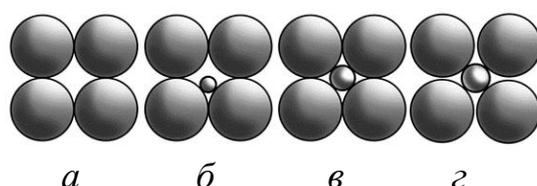


Рис. 1. Теоретически возможное взаимораспределение частиц клинкерного компонента: *a* – схема № 1; *б* – № 2; *в* – № 3; *г* – № 4

Для значимого повышения качества цемента и темпов твердения на ранней стадии, а также обеспечения возможности получения высокопрочного бетона с минимальным расходом цемента вводилась третья фракция с удельной поверхностью $4\ 500\ \text{см}^2/\text{г}$ (рис. 2), что является третьим уровнем упаковки дисперсного состава вяжущего вещества.

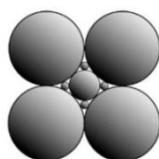


Рис. 2. Геометрическая схема распределения частиц трехфракционного клинкерного компонента

В соответствии с задачей исследования были приготовлены опытные партии клинкерного компонента и определено оптимальное содержание каждой в составе разномодальных композиций. Предварительно найденные объемы каждой исходной фракции (1 200, 2 700, 4 500 см²/г) выбрали в качестве эталона. Были приняты три фракции цемента, которые тщательно перемешивали между собой и помещали в кювету прибора ПСХ с целью определения изменения пустотности приготовленных порошков. Результаты экспериментальных исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Оценка пустотности полидисперсного вяжущего

Удельная поверхность фракции, см ² /г			Содержание, %			Изменение высоты пробы в кювете, мм	Проценты от контрольного объема пустот
1 200	–	–	100	–	–	1,13	–
2 700	–	–	100	–	–	1,2	–
4 500	–	–	100	–	–	1,2	–
1 200	2 700	–	90	10	–	1,12	100
1 200	2 700	–	85	15	–	1,05	93
1 200	2 700	–	80	20	–	1,1	97
1 200	2 700	–	75	25	–	1,11	98
1 200	2 700	–	70	30	–	1,12	99
1 200	4 500	–	80	20	–	1,06	91
2 700	4 500	–	80	20	–	1,18	105
1 200	2 700	4 500	87	10	3	1,16	103
1 200	2 700	4 500	85	10	5	1,05	93
1 200	2 700	4 500	80	15	5	1,16	103

Установлено, что минимальная пустотность наблюдается при смешении двух фракций клинкерного компонента с дисперсностью 1 200 и 2 700 см²/г в количестве 85 и 15 %, которая уменьшается на 7 % относительно контрольного состава. При смешении трех фракций с дисперсностью 1 200, 2 700 и 4 500 см²/г в количестве 85, 10 и 5 % соответственно пустотность многофракционной системы также уменьшается на 7 %. Полученное снижение плотности разнофракционных цементов может обеспечить повышение прочности в среднем до 35 %.

Таким образом, оптимальная дисперсность состава клинкерного цемента на двух и трех уровнях обеспечивает снижение пустот, что может обеспечить повышение прочности цемента на 35–40 %. Результаты испытания на прочность образцов из полидисперсного цемента представлены в табл. 2.

Таблица 2

Прочность бетона из полидисперсного цемента

Образец (состав)	Прочность на сжатие, МПа/%, в возрасте, сут.	
	7	28
Состав 1 – контрольный	29/100	40/100
Состав 2 – полидисперсное вяжущее; фракции, см ² /г: 1 200 (85 %) + 2 700 (10 %) + 4 500 (5 %)	49/169	53/133
Состав 3 – полидисперсное вяжущее; фракции, см ² /г: 1 200 (85 %) + 2 700 (15 %)	47/162	52/131
Состав 4 – полидисперсное вяжущее; фракции, см ² /г: 2 700 (80 %) + 4 500 (20 %)	20/69	41/104
Состав 5 – полидисперсное вяжущее; фракции, см ² /г: 1 200 (80 %) + 4 500 (20 %)	35/121	48/120

Анализ приведенных в табл. 2 данных показывает, что оптимальным является состав 2, у которого наблюдается наибольшая прочность в сравнении с контрольным (составом 1).

Влияние управляющих факторов на основные параметры качества бетона анализировали при помощи метода планирования эксперимента с использованием рототабельного композиционного плана.

Для проведения эксперимента расход материалов для получения бетонных смесей (воды, гранитного щебня, песка и гиперпластификатора Melflux 5581 F) на 1 м³ установлен для всех разработанных составов постоянным и равным соответственно 128 л, 960 кг, 1 048 кг и 0,8 кг. Входные факторы, влияющие на прочность на сжатие ($R_{сж}$), растяжение при изгибе ($R_{изг}$) и водопоглощение (W_m), отображены в табл. 3.

Таблица 3

Интервалы и уровни варьирования входных факторов
для планирования эксперимента второго порядка

Входные факторы			Основные уровни	Интервалы варьирования
Наименование	Натуральный вид	Переменная		
Содержание неионогенного полимера	C_d	x_1	0,2	0,1
Содержание базальтового волокна	C_ϕ	x_2	0,7	0,15

Примечание. x_1 – содержание полимера «Полидон-А» C_d , % от массы вяжущего; x_2 – содержание базальтового волокна (фибры) C_ϕ , % от объема.

Результаты испытаний, проведенных в соответствии с выбранным планом, даны в табл. 4. Согласно плану эксперимента, для каждого исследуемого состава подготовлено и испытано по три образца с фиксированием результатов.

Таблица 4

Результаты испытаний рассчитанных составов
модифицированного тяжелого бетона

№ п/п	C _д , %	C _ф , %	Факторы в кодированном значении		Результаты		
			x ₁	x ₂	R _{сж} , МПа	R _{изг} , МПа	W _т , мас. %
1	0,3	0,85	+1	+1	55,8	6,58	2,7
2	0,1	0,85	-1	+1	49,0	6,11	3,3
3	0,3	0,55	+1	-1	50,1	5,96	3,0
4	0,1	0,55	-1	-1	51,8	6,37	2,6
5	0,341	0,7	+1,414	0	54,7	6,52	2,5
6	0,059	0,7	-1,414	0	49,5	6,45	3,9
7	0,2	0,912	0	+1,414	55,7	6,35	2,7
8	0,2	0,488	0	-1,414	52,6	5,86	2,6
9	0,2	0,7	0	0	60,3	6,78	2,4

Используя формулы для расчета коэффициентов ортогонального центрального планирования второго порядка, были получены значения коэффициентов регрессионных уравнений (табл. 5).

Таблица 5

Коэффициенты регрессионных уравнений второго порядка

Исследуемая характеристика		b ₀	b ₁	b ₂	b ₁₂	b ₁₁	b ₂₂
Y ₁	R _{сж} , МПа	60,30	1,557	0,911	2,125	-4,463	-3,438
Y ₂	R _{изг} , МПа	6,780	0,020	0,132	0,220	-0,158	-0,348
Y ₃	W _т , мас. %	2,400	-0,273	0,068	-0,250	0,394	0,119

Получены е уравнения регрессии:

$$Y_1 = 60,3 + 1,55x_1 + 0,91x_2 + 2,13x_1x_2 - 4,46x_1^2 - 3,44x_2^2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 6,78 + 0,02x_1 + 0,13x_2 + 0,22x_1x_2 - 0,16x_1^2 - 0,35x_2^2; \quad (2)$$

$$Y_3 = 2,4 - 0,27x_1 + 0,07x_2 - 0,25x_1x_2 + 0,39x_1^2 + 0,12x_2^2. \quad (3)$$

При помощи инструментов компьютерной программы Matlab R2015a были получены изображения поверхности выражения целевых функций для регрессионных уравнений (1)–(3) и определены значения переменных x_1 и x_2 , при которых искомая функция (y) принимает максимальное или минимальное значение (рис. 3–5).

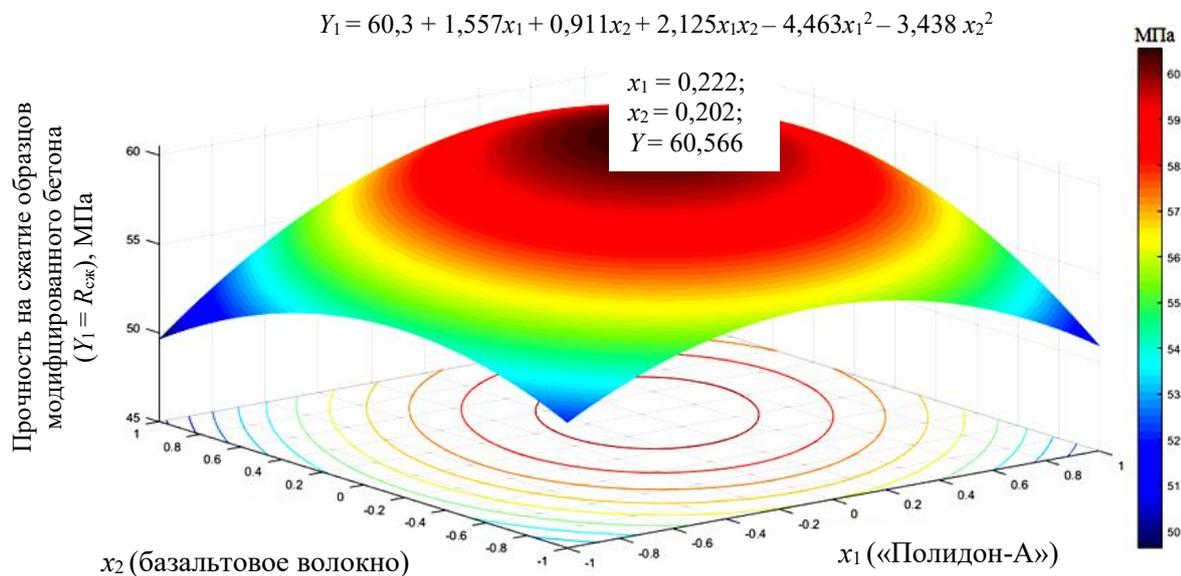


Рис. 3. Графическое изображение поверхности регрессионного уравнения (1) второго порядка

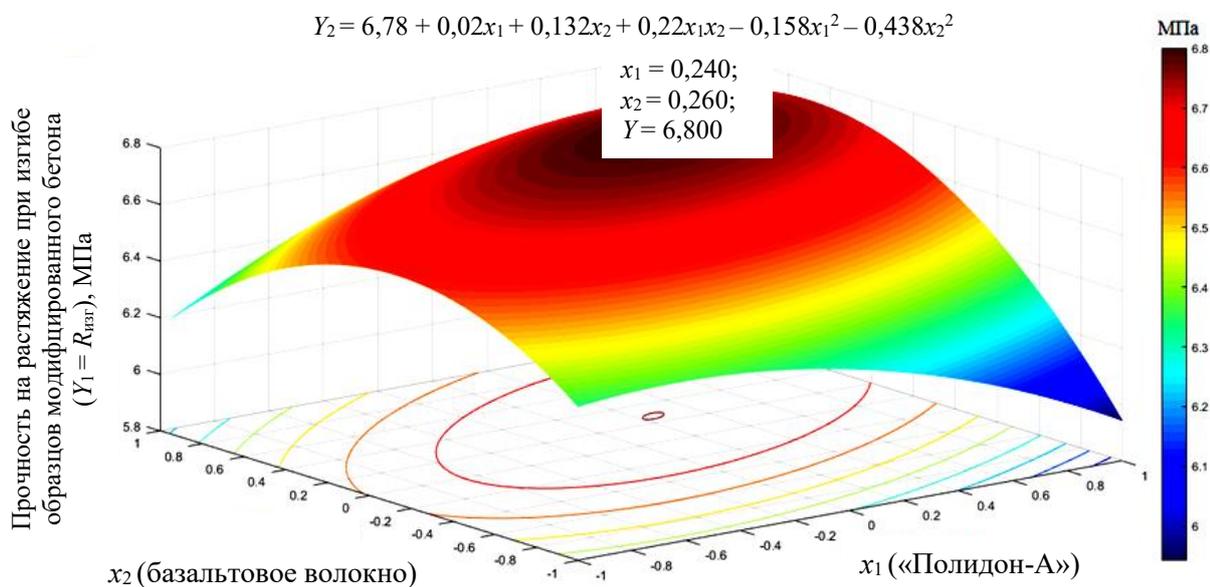


Рис. 4. Графическое изображение поверхности регрессионного уравнения (2) второго порядка

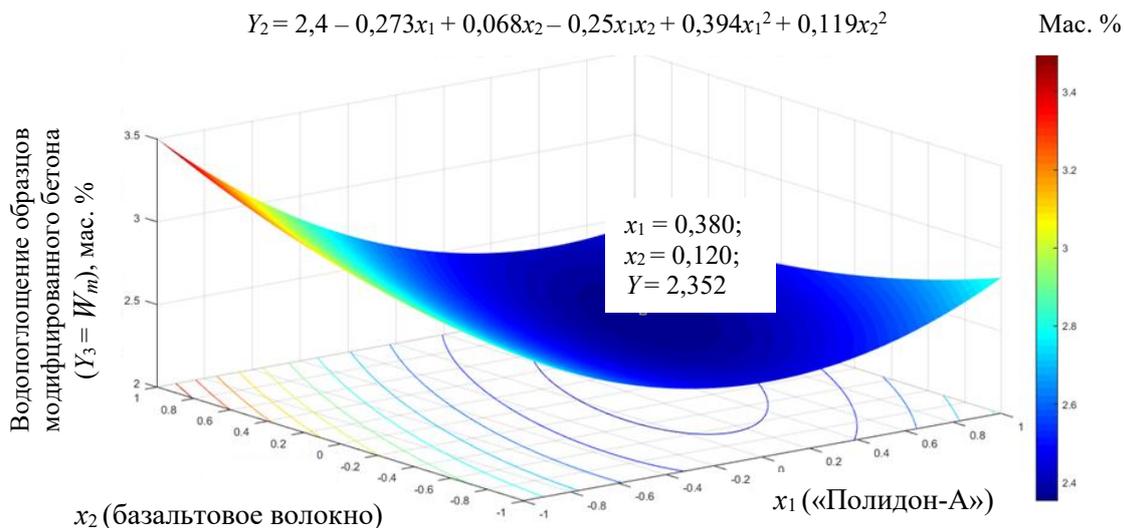


Рис. 5. Графическое изображение поверхности регрессионного уравнения (3) второго порядка

Адекватность уравнений регрессии проверялась автоматически по критериям Стьюдента и Фишера. Ошибка при аппроксимации находилась в пределах 1–2 %. С использованием инструментов компьютерной программы Matlab R2015a найдено максимальное значение целевой функции регрессионного уравнения второго порядка:

$MAX Y_{1max} = 60,566$ при $x_1 = 0,222$ и $x_2 = 0,202$, что в натуральных значениях составляет 0,222 и 0,703 % соответственно;

$MAX Y_{2max} = 6,800$ при $x_1 = 0,240$ и $x_2 = 0,260$, что в натуральных значениях составляет 0,224 и 0,739 % соответственно;

$MAX Y_{3min} = 2,352$ при $x_1 = 0,380$ и $x_2 = 0,120$, что в натуральных значениях составляет 0,238 и 0,718 % соответственно;

Установлены оптимальные значения $x_{1opt} = 0,231$ и $x_{2opt} = 0,711$ в натуральном виде, при которых функция Y_1 (прочность на сжатие $R_{сж}$) принимает максимальное значение, а Y_3 (водопоглощение W_m) – минимальное. После подстановки найденных значений в уравнения (1)–(3) были определены прочность на сжатие $R_{сж} = 59,68$ МПа, растяжение при изгибе $R_{изг} = 6,73$ МПа, водопоглощение $W_m = 2,43$ %.

Выводы:

1. Исследовано влияние трехфракционного состава клинкерного компонента цементных частиц (1 200, 2 700, 4 500 см²/г) на снижение межчастичной пустотности до 7 % и повышение прочности на 35–40 % относительно контрольного состава.

2. Обоснована и экспериментально доказана возможность получения тяжелого бетона с повышенными эксплуатационными показателями за счет совместного применения полидисперсного вяжущего с комплексным полимерным модификатором (Melflux + «Полидон-А») и микроармирующим базальтовым волокном.

3. С помощью методов математического планирования эксперимента и методов регрессионного анализа оптимизирован состав модифицированного тяжелого бетона по прочности на сжатие, растяжению при изгибе, водопоглощению. Определено оптимальное содержание базальтового армирующего волокна и полимера «Полидон-А» (соответственно 0,75 и 0,2 % от массы вяжущего).

Библиографический список

1. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: АСВ, 2006. 368 с.
2. Исследование пористости цементного камня, модифицированного комплексными органоминеральными модификаторами / В.И. Соловьев [и др.] // Фундаментальные исследования. 2014. № 8. Ч. 3. С. 590–595.
3. Самченко С.В., Абрамов М.А., Егоров Е.С. Особенности протекания гидратации и твердения цементных паст с добавкой гидратированного цемента // Техника и технология силикатов. 2020. Т. 27. № 1. С. 24–28.
4. Энтин З.Б., Юдович Б.Э. Многокомпонентные цементы // Научные труды НИИцемент. 1994. Вып. 107. С. 3–76.
5. Петропавловская В.Б. Использование минеральных ультрадисперсных модификаторов на основе отходов промышленности в гипсовых композитах // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 18–23.
6. Величко Е.Г., Шумилина Ю.С. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 2. С. 235–243.
7. Модифицированные гипсовые безобжиговые композиты / В.Б. Петропавловская [и др.] // Строительные материалы. 2013. № 5. С. 76–79.
8. Сравнительный анализ способов модифицирования шлакопортландцемента ультрадисперсным компонентом / С.В. Самченко [и др.] // Техника и технология силикатов. 2020. Т. 27. № 4. С. 113–120.
9. Калашников В.И. Промышленность нерудных строительных материалов и будущее бетонов // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 20–23.
10. Новые высокоэффективные бетоны / О.В. Суздальцев [и др.] // Новый университет. Серия: Технические науки. 2014. № 7-8 (29-30). С. 44–47.
11. Самченко С.В., Егоров Е.С. Управление свойствами цементной пасты при ее модифицировании предварительно гидратированной цементной суспензией // Техника и технология силикатов. 2021. Т. 28. № 2. С. 54–58.
12. Ткач Е.В., Темирканов Р.И. Улучшение физико-механических свойства модифицированного бетона на основе применения химически активированного микрокремнезема с микроармирующим волокном // Строительство и реконструкция. 2020. № 2 (88). С. 123–135.

13. Филимонова Ю.С., Величко Е.Г. Исследование комплексной модификации тяжелого бетона // Строительство и реконструкция. 2021. № 4 (96). С. 107–109.

14. Ткач Е.В., Филимонова Ю.С., Корнеев А.И. Тяжелый бетон на основе полидисперсного вяжущего с комплексным полимерным модификатором с повышенными эксплуатационными показателями // Строительство и реконструкция. 2022. № 2 (100). С. 112–119.

MODIFIED HEAVY CONCRETE BASED ON POLYDISPERSE BINDER FOR HYDROMELIORATIVE CONSTRUCTION

E.V. Tkach, Yu.S. Filimonova, A.F. Buryanov

***Abstract.** The influence of the three-level dispersed composition of the clinker component of cement particles on the reduction of interparticle voidness and the increase in the strength of the cement stone was studied. The resulting modified concrete based on a polydisperse binder is characterized by an increase in compressive strength up to 59,68 MPa, tensile strength 6,73 MPa and a decrease in water absorption up to 2,43 % in comparison with the control composition. The obtained performance indicators give us the opportunity to recommend it for the production of building products and structures operating in harsh operating conditions (in particular, for irrigation system trays).*

***Keywords:** modified concrete, dispersed composition of the clinker component, polydisperse binder.*

Об авторах:

ТКАЧ Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: ev_tkach@mail.ru

ФИЛИМОНОВА Юлия Сергеевна – преподаватель кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: JuliaS06@mail.ru

БУРЬЯНОВ Александр Федорович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Москва. E-mail: rga-service@mail.ru

About the authors:

TKACH Evgeniya Vladimirovna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia. E-mail: ev_tkach@mail.ru

FILIMONOVA Yulia Sergeevna – Lecturer of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia. E-mail: JuliaS06@mail.ru

BURYANOV Alexander Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials Science, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia. E-mail: rga-service@mail.ru

УДК 692.4

ОСОБЕННОСТИ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР, ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СКЛАДОК И ОБОЛОЧЕК

Г.С. Тырин, А.В. Бровкин, А.В. Новиков, Б.А. Гогаладзе

© Тырин Г.С., Бровкин А.В.,
Новиков А.В., Гогаладзе Б.А., 2023

Аннотация. В статье представлен обзор большепролетных конструкций покрытий, приведена их классификация. Раскрыто понятие структурной стержневой системы, рассмотрены оболочки и их особенности.

Ключевые слова: большепролетные конструкции, пространственная стержневая структура, складки, оболочки.

Структурные конструкции давно активно применяются в строительстве промышленных и гражданских зданий благодаря ряду положительных качеств, среди которых значатся универсальность, возможность изготовления на высокопроизводительных производственных линиях, простота транспортировки и монтажа. Эти системы, имеющие «кристаллическую» структуру, напоминают очень прочные образования органической природы, откуда проистекают такие преимущества, как повышенная надежность, пространственность работы системы, возможность свободного размещения технологических устройств и максимальная унификация узлов и стержневых элементов. Однако нестабильная ситуация и прогрессирующая экономическая изоляция РФ привели к росту цен на металлопродукцию, являющуюся основным материалом для таких конструкций. В связи с этим актуален вопрос оптимизации серийного решения, а также проведение сравнительного анализа возможного экономичного аналога исходя из требований объекта, конкретных нагрузений строи-

Для покрытия характерно наличие консольных участков пролетом 6 м. Шарнирное примыкание многоэлементной системы к колоннам достигается через капители, образованные стержнями в виде перевернутых пирамид, основанием которых выступают стержни нижнего пояса, а вершины крепятся к колоннам (рис. 2). Требуемым характеристикам составных единиц структурного покрытия отвечают электросварные и горячекатаные круглые стальные трубы с обваренными на концах шайбами. По концам стержни плиты закреплены ввинчиванием в специальные полусферические элементы – коннекторы, представляющие собой пространственные фасонки в виде разрезанных пополам или целых многогранников с резьбовыми отверстиями, в которые ввинчиваются стержни высокопрочных болтов, предусмотренных по концам элементов, путем пропуска через отверстия шайб. В верхних узлах пространственной решетчатой стержневой системы устанавливаются прогоны из швеллеров, на которые осуществляется монтаж стального профилированного настила покрытия. В стержневой системе растягивающие усилия от узла передаются на стержни высокопрочными болтами, а сжимающие – шестигранными муфтами [2].

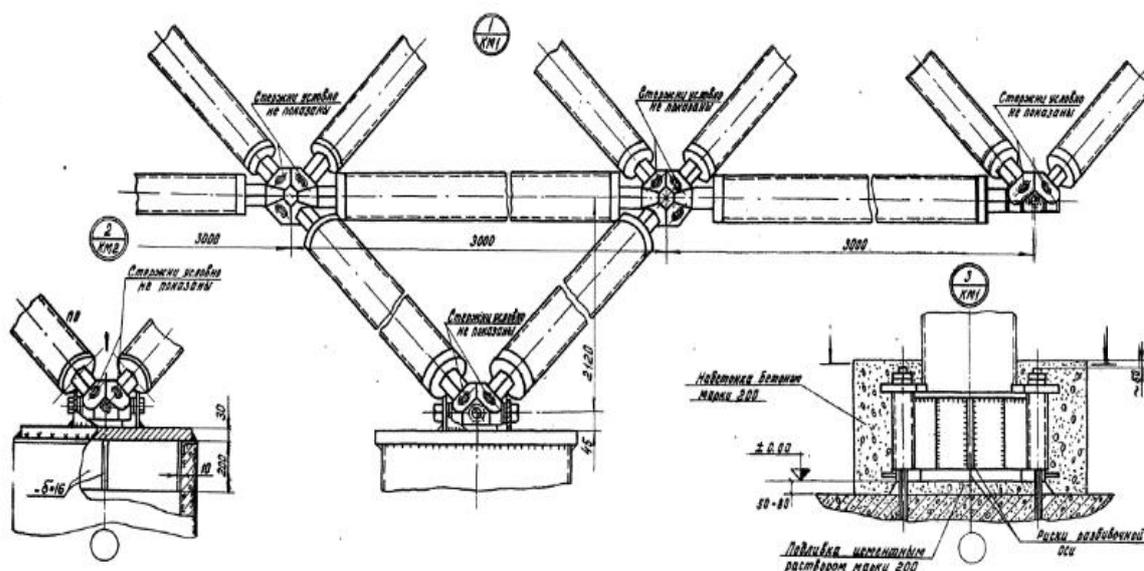


Рис. 2. Соединения элементов пространственной структуры [2]

Прочность и устойчивость структурных конструкций проверяются расчетом в соответствии с указаниями [3]. При этом в зоне ослабления растянутых элементов отверстиями под болты допускается развитие пластических деформаций. Расчет болтов нормальной точности, работающих на срез и смятие в узлах соединений, производится аналогично [3].

Элементы узловых соединений, работающие на сжатие в системе «МАРХИ» – «Кисловодск», рассчитываются по типу соединений с фрезерованными торцами.

Несущая способность высокопрочных болтов системы «Кисловодск», работающих в узловых соединениях на центральное растяжение, определяется в зависимости от механических свойств болтов после их термической обработки.

В то же время при расчетах методом итераций отдельные мало нагруженные элементы нижнего пояса и подкосов могут быть исключены из конечно-элементной модели. Тем самым контролируются максимальный прогиб всей системы покрытия и конечная податливость сжатых элементов. При удалении «лишних» членов из такой модели необходимо контролировать геометрическую неизменность пространственной системы.

К достоинствам структурных покрытий относятся пространственная работа при многократной статической неопределимости (многосвязности системы), гарантирующая перераспределение усилий в стержнях при внезапном разрушении некоторых из них; единообразие стержней и их примыканий друг к другу; возможность использования вариативного кровельного покрытия и подвесных потолков благодаря частому расположению опорных точек в узлах; сборка массивных пролетных блоков без помощи подъемных механизмов; адаптируемость к планам со сложной и нерегулярной расстановкой опор; свобода при выносе конструкций на фасад.

Недостатками структурных покрытий, отчасти сопряженными с их достоинствами, являются:

сложность узлов и высокая точность, необходимая для их изготовления;

неизбежные «подвижки» в многочисленных узлах (исключая сварные).

Кроме того, сложность и трудоемкость изготовления, сборки и экономии металла зависят от вида сборки, точности ее изготовления, массы сборки, поэтому выбор способа соединения элементов в узлах представляет собой наиболее сложную конструктивную задачу.

Конструкции узловых элементов чрезвычайно разнообразны. Для трубчатых элементов наиболее логична конструкция узла, где основным соединением служит болтовое соосное со стержнями и работающее на продольные усилия.

Возможны две композиционные схемы данного узла:

1) болт, выходящий из трубчатого стержня, ввинчивается в узловой элемент;

2) болт, выходящий из узлового элемента, ввинчивается в трубчатый стержень.

Способы опирания таких покрытий:
 по контуру на наружные стены или колонны, установленные с определенным шагом;
 на колонны внутри контура.

Складчатые конструкции

Складчатые железобетонные пространственные конструкции состоят из плоских элементов – граней, соединенных друг с другом таким образом, что в месте их сопряжения образуется прямолинейное ребро, по которому возникающие в них усилия могут передаваться с одной грани на другую (касательные усилия, нормальные усилия и изгибающие моменты).

Наиболее пропорциональная зависимость между опорным и пролетным моментами создается благодаря оптимальному месту опирания складок на колонны. Осевое смещение стоек внутрь позволяет создать такое напряженное состояние, при котором система способна воспринимать горизонтальные усилия и обеспечивать тем самым поперечную жесткость и устойчивость всей конструкции.

Висячая оболочка

Висячей железобетонной оболочкой называется оболочка, в которой роль основной рабочей арматуры выполняют ванты (рис. 3).

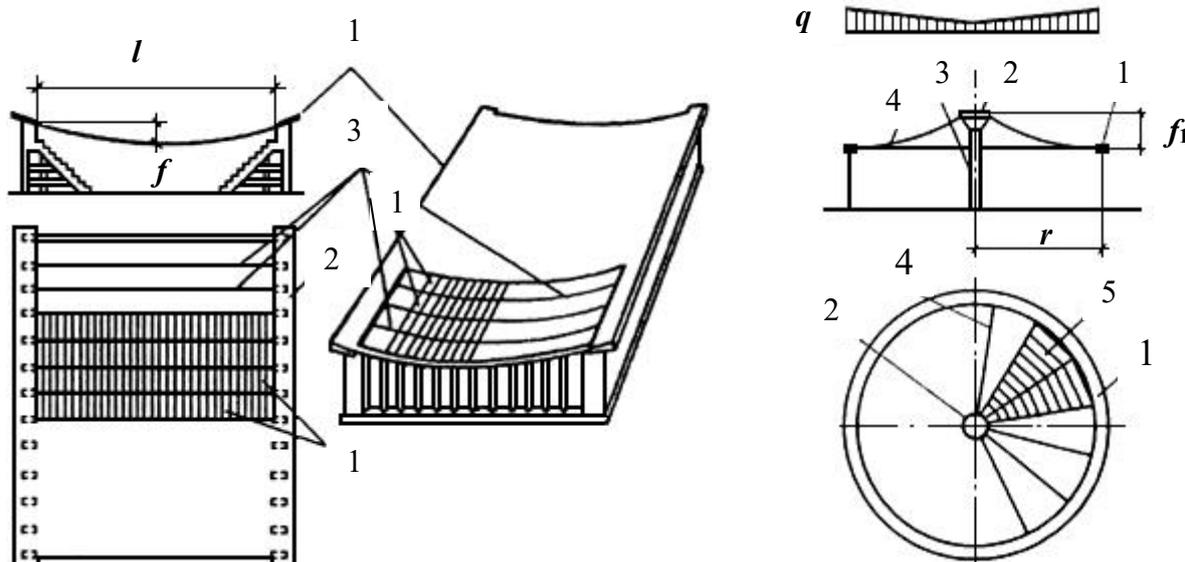


Рис. 3. Схема висячей оболочки [5]: 1 – опорный контур; 2 – растянутое кольцо; 3 – центральная опора; 4 – ванты; 5 – плиты

Оболочка положительной гауссовой кривизны

Пологими считаются оболочки, удовлетворяющие следующему соотношению подъема над опорным планом к определяющим габаритам:

$$f_1 \leq a/5 \text{ и } f_2 \leq b/5,$$

где $2a$ и $2b$ – размеры стороны оболочки в плане; f_1 и f_2 – стрелы подъема оболочки на контуре (рис. 4).

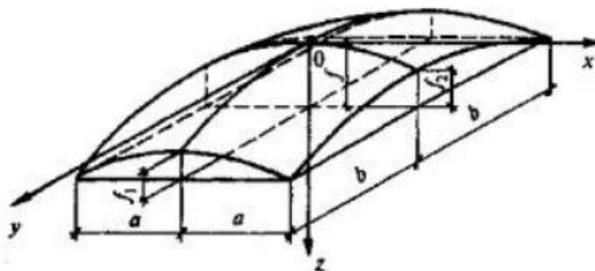


Рис. 4. Схема оболочки положительной гауссовой кривизны [5]

Очертание оболочки определяет тип срединной поверхности. Ее рекомендуется задавать через поверхность переноса или вращения.

Для разбивки оболочек на взаимно монтируемые части применяется система радиальных секущих плоскостей, проходящих через ось вращения, и система вертикальных плоскостей, перпендикулярных к этой оси (рис. 5). Путем подобного деления полосы, пересекаемые равноудаленными радиальными секущими плоскостями внутри оболочки, становятся равновеликими, что позволяет сократить число типоразмеров сборных плит.

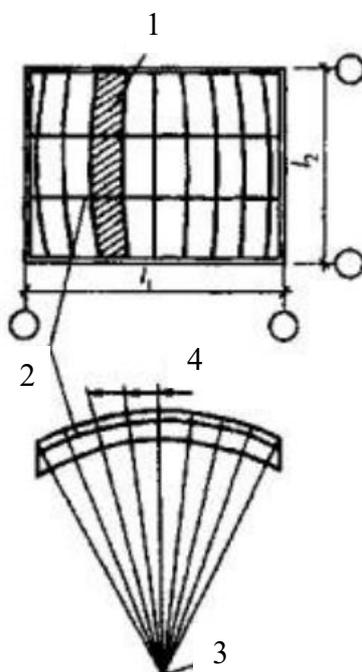


Рис. 5. Схема членения исходной поверхности оболочки на сборные элементы [5]: 1 – элемент членения; 2 – вертикальные секущие плоскости; 3 – ось вращения радиальных секущих плоскостей; 4 – радиальные секущие плоскости

Оболочка отрицательной гауссовой кривизны

Классическим представителем оболочки отрицательной гауссовой кривизны является поверхность гиперболического параболоида (гипара).

Имея прямоугольные очертания в плане со сторонами $2a$ и $2b$, оболочка повторяет поверхность гиперболического параболоида с выпуклой кверху гранью и стрелой подъема f_1 над $2a$ и соответственно выпуклой книзу и стрелой провеса f_2 над стороной $2b$ (рис. 6).

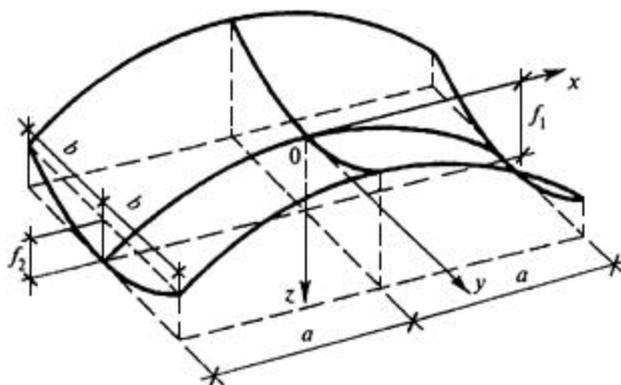


Рис. 6. Гиперболический параболоид [5]

Перекрываемые оболочкой пространства могут варьироваться габаритами в широких пределах (10–70 м и более). Ключевое применение заключается в покрытии общественных, складских объектов и зданий производственного назначения в виде одно- и многолепестковых гипар, а также их комбинаций. При расчете оболочек отрицательной гауссовой кривизны наибольшее внимание рекомендуется уделять загрузкам несимметричного направления, вызывающим критические напряжения и деформации.

Вспарушенные панели

Вспарушенные панели с плоской верхней поверхностью являются пространственными элементами перекрытий и покрытий. Они определяются переменной толщиной, увеличивающейся к контуру, и выпуклой срединной поверхностью, описанной на плоском контуре (рис. 7). Конструирование изменяемой толщины может быть разным, но наиболее часто оно выполняется в виде ступенчатого перехода (такие панели называют ступенчато-вспарушенными).

Прямоугольные вспарушенные панели применяются в разрезных (однопролетных), неразрезных (многопролетных) перекрытиях и покрытиях, а также включаются в виде среднего распорного фрагмента в сборное безбалочное перекрытие.

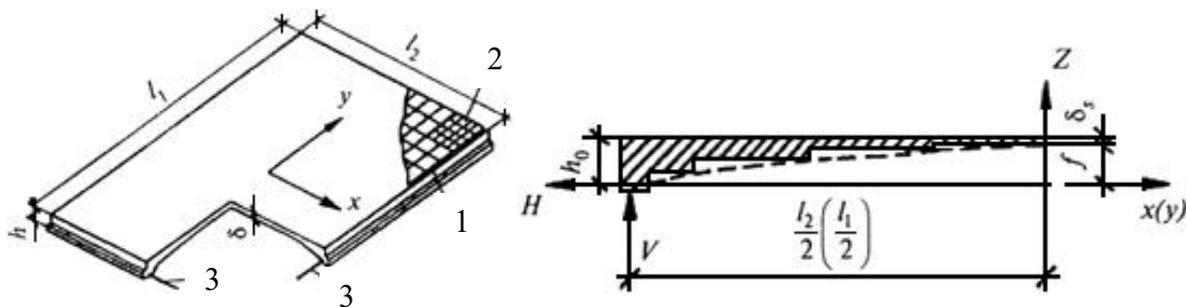


Рис. 7. Схема вспарушенной панели [5]:

- 1 – арматурная сетка; 2 – дополнительные сетки в углах панели;
3 – предварительно напряженный арматурный пояс

Применение и развитие большепролетных конструктивных систем являются следствием повышения качества и надежности проектирования, строительства и эксплуатации. Тщательный аналитический подбор и расчет всех элементов строения, в которых используются структурные стержневые системы, позволяют задействовать весь потенциал свойств материала и добиться максимально эффективной работы конструкции.

Библиографический список

1. Рекомендации по проектированию структурных конструкций. М.: Стройиздат, 1984. 298 с.
2. Серия 1.466-2. Пространственные решетчатые конструкции из труб типа «Кисловодск». М.: Госстрой СССР, 1973. 16 с.
3. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции (актуализированная редакция СНиП II-23-81*). М.: Минрегион России, 2017. 177 с.
4. Таратута В.Д., Бегельдиев А.М. Большепролетные конструкции промышленных и гражданских зданий и сооружений: учебное пособие. Краснодар: КубГАУ им. И.Т. Трубилина, 2017. 186 с.
5. СП 52-117-2008*. Железобетонные пространственные конструкции покрытий и перекрытий. Методы расчета и конструирования. М.: Строительство, 2010. 150 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/d49/4293833592.pdf> (дата обращения: 18.04.2023).

FEATURES OF LARGE-SPAN METAL STRUCTURES, REINFORCED CONCRETE FOLDS AND SHELLS

G.S. Tyrin, A.V. Brovkin, A.V. Novikov, B.A. Gogaladze

Abstract. The article presents an overview of large-span coating structures, their classification is given. The concept of a structural core system is revealed, shells and their features are considered.

Keywords: large-span structures, spatial core structure, folds, shells.

Об авторах:

ТЫРИН Георгий Сергеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: tyrin.goha@mail.ru

БРОВКИН Андрей Викторович – доцент кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: a.brovkin@gmail.com

НОВИКОВ Алексей Витальевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: lehand1423@gmail.com

ГОГАЛАДЗЕ Борис Александрович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: gogaladze-b@mail.ru

About the authors:

TYRIN Georgy Sergeevich – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: tyrin.goha@mail.ru

BROVKIN Andrey Viktorovich – Docent of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: a.brovkin@gmail.com

NOVIKOV Aleksey Vitalievich – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: lehand1423@gmail.com

GOGALADZE Boris Alexandrovich – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: gogaladze-b@mail.ru

УДК 691.175.3

ВОЗМОЖНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТЕКЛОПОЛНЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ С АГРЕССИВНЫМИ ЖИДКИМИ СРЕДАМИ

И.М. Ширялин, А.А. Бондарь, Е.И. Лагусева

**© Ширялин И.М., Бондарь А.А.,
Лагусева Е.И., 2023**

Аннотация. В статье рассмотрена проблема потери первоначальных характеристик стеклокомпозита в результате воздействия внешних факторов, а именно агрессивных сред. Исследование проводилось на стеклопластиковых образцах, изготовленных методом контактного формования из ортофталевой ненасыщенной полиэфирной смолы и эмульсион-

ного стекломата. На основе полученных данных выявлена оптимальная среда для эксплуатации стеклонаполненных конструкционных изделий.

Ключевые слова: стеклопластик, агрессивная среда, композит, влияние, деструкция, выщелачивание, оптимальность.

Повышение качества и безопасности продукции зависит от природы сырья, используемого в процессе производства.

На сегодняшний день наблюдается тенденция к переходу от традиционных материалов к полимерным композитам, таким как стеклопластик, который представляет собой двухкомпонентный гетерофазный материал, образованный сочетанием синтетического полимерного связующего и стеклянного армирующего наполнителя.

Несмотря на все достоинства стеклокомпозита, последний (так же, как и его традиционные аналоги (дерево, металл)) в процессе хранения и эксплуатации подвержен действию внешних факторов, одним из которых являются агрессивные среды.

Процесс воздействия агрессивных сред включает в себя три этапа: проникновение среды в глубину стеклопластика в результате сорбции и диффузии; набухание материала; химические реакции (деструкцию полимерной матрицы и (или) выщелачивание стекла).

Особенно остро проблема потери стеклопластиком первоначальных характеристик вследствие взаимодействия с агрессивной средой стоит для изделий, контактирующих с ней постоянно, т. е. для емкостей, резервуаров, трубопроводов и др. [1].

Цель исследования состоит в повышении надежности и качества стеклопластиковых конструкционных изделий путем подбора оптимальных сред для их эксплуатации.

Для реализации поставленной цели изучалось деструктивное воздействие кислот, щелочей, аминов, пероксидов, многоатомных спиртов и смеси жидких углеводородов на стеклонаполненные композиты.

Исследование проводилось на 20 стеклопластиковых образцах стандартного размера 165x13x4 мм (ГОСТ Р 56800-2015), изготовленных с помощью метода контактного формования из ортофталевой ненасыщенной полиэфирной смолы и эмульсионного стекломата, которые были помещены в агрессивные среды: муравьиную кислоту (25 %); гидроксид калия (15 %); уксусную ледяную кислоту; пероксид водорода (25 %); дистиллированную воду; гексаметилендиамин (50 %; водный); керосин; ацетон; глицерин.

Контроль изменения массы образцов путем их взвешивания перед началом эксперимента и после погружения в растворы осуществлялся каждые сутки. График зависимости изменения массы стеклопластиковых образцов от времени их выдержки в указанных агрессивных средах представлен на рис. 1.

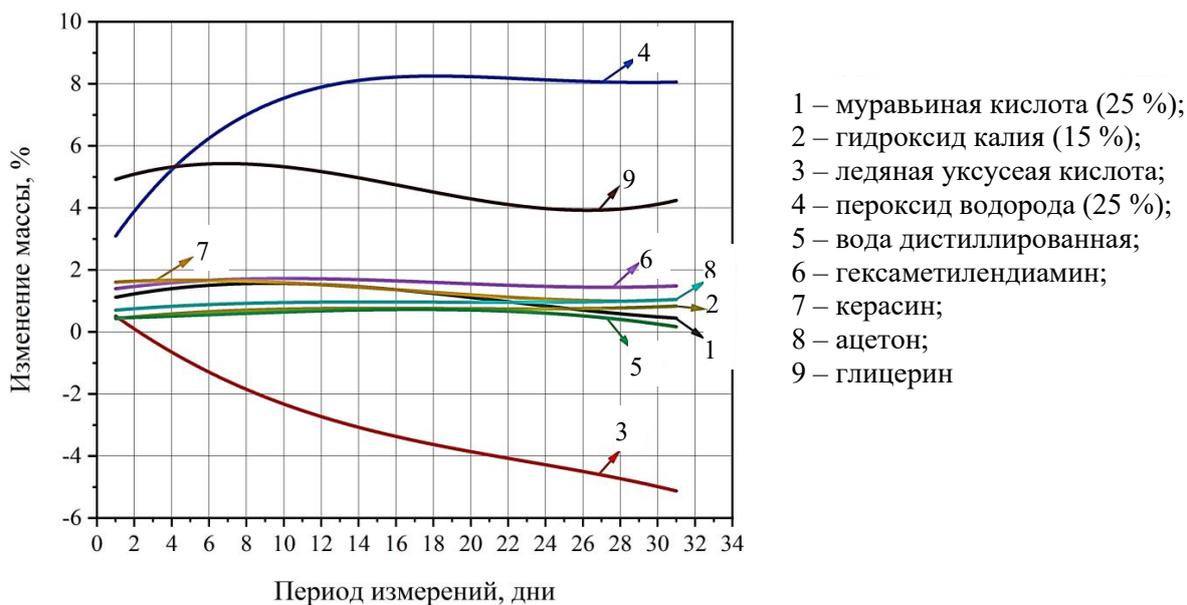


Рис. 1. Зависимость изменения массы стеклопластиковых образцов от времени их выдержки в агрессивных средах [2]

Стеклопластиковые образцы, выдержанные в агрессивных средах до постоянства масс, были подвергнуты сушке в течение 7 дней при температуре 20 °С, после чего производилось контрольное взвешивание композита. Графическая интерпретация итоговых значений изменения массы образцов представлена в виде гистограммы на рис. 2.

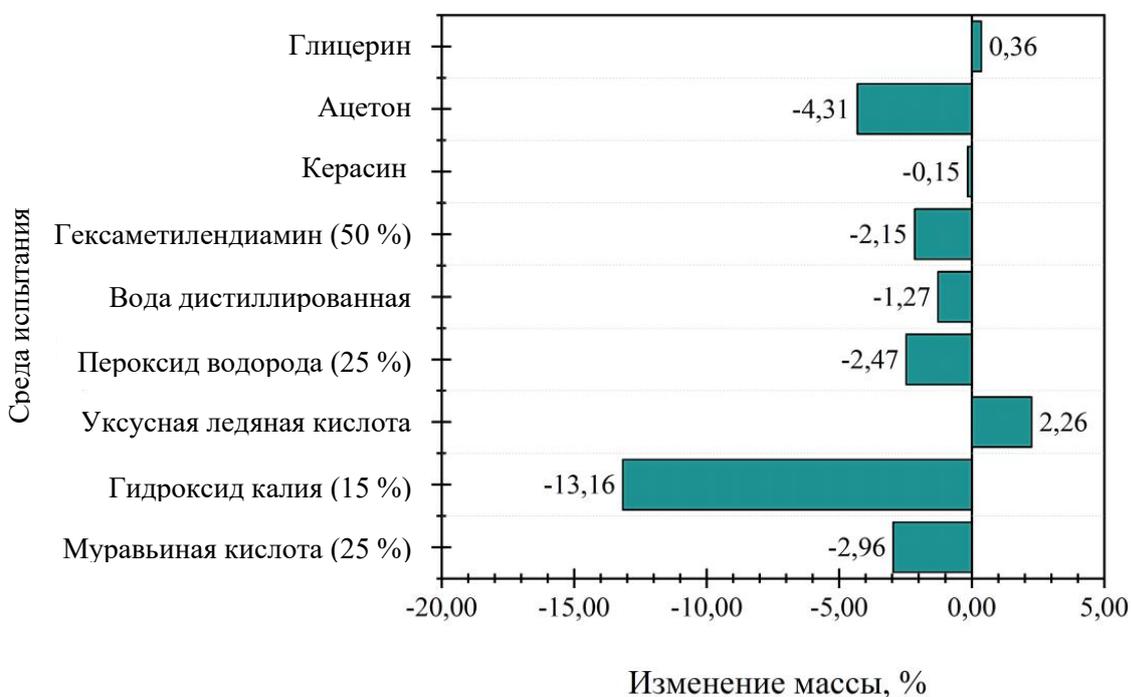


Рис. 2. Зависимость изменения массы от природы агрессивной среды [2]

Установлено, что наименьшее деструктивное воздействие на стеклокомпозит, изготовленный методом контактного формования из ортофталевой ненасыщенной полиэфирной смолы и эмульсионного стекломата, оказывают многоатомные спирты и нефтепродукты (керосин). Данный аспект подтверждается незначительным изменением массы композита, являющейся следствием минимального количества протекания химических реакций, а именно деструкции полимерной матрицы и (или) выщелачивания стекла.

Библиографический список

1. Ширялин И.М. Влияние строения терморек- тивного связующего на химическую стойкость и предел прочности на разрыв стеклопластика // XXVIII Каргинские чтения: тезисы докладов / отв. за вып.: П.М. Па- хомов, Н.П. Русакова. Тверь: ТвГТУ, 2022. С. 175.

2. Ширялин И.М., Бондарь А.А, Лагусева Е.И. Влияние процесса постполимеризации на прочностные свойства стеклопластиков // Химиче- ская термодинамика и кинетика: материалы XII Международной научной конференции. Великий Новгород: НовГУ, 2022. С. 359.

THE POSSIBILITY OF USING GLASS-FILLED STRUCTURAL PRODUCTS IN WORKING CONDITIONS WITH AGGRESSIVE LIQUID MEDIA

I.M. Shiryalin, A.A. Bondar, E.I. Laguseva

***Abstract.** The article considers the problem of loss of the initial characteristics of the glass composite as a result of external factors, namely aggressive media. The study was carried out on fiberglass samples made by contact molding from orthophthalic unsaturated polyester resin and emulsion glass wool. Based on the data obtained, the optimal environment for the operation of glass-filled structural products has been identified.*

***Keywords:** fiberglass, aggressive environment, composite, influence, destruction, leaching, optimality.*

Об авторах:

ШИРЯЛИН Илья Михайлович – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»; инженер-конструктор, АО «ЦКБ ТМ», Тверь. E-mail: shiryalini@mail.ru

БОНДАРЬ Александра Александровна – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет»; инженер-технолог 1-й категории группы неметаллических материалов, техническая дирекция ООО «КСК МК», Тверь. E-mail: aleksa.karaseva2010@yandex.ru

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

About the authors:

SHIRYALIN Ilya Mikhailovich – Master's Student, Tver State Technical University, Design Engineer, JSC «TSKB TM», Tver. E-mail: shiryalini@mail.ru

BONDAR Alexandra Alexandrovna – Postgraduate Student, Tver State Technical University; Engineer-Technologist of the 1st Category of Non-Metallic Materials Group, Technical Directorate of LLC «KSK MK», Tver. E-mail: aleksa.karaseva2010@yandex.ru

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

УДК 691.328.34

ПРИМЕНЕНИЕ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА

Д.С. Шишаев, Т.Р. Баркая, А.Д. Шишаева, М.Ф. Котикова

© Шишаев Д.С., Баркая Т.Р.,
Шишаева А.Д., Котикова М.Ф., 2023

Аннотация. В статье рассматриваются возможности и перспективы использования газобетона неавтоклавного твердения в монолитных конструкциях, возводимых непосредственно на строительной площадке. Описаны способы включения монолитного газобетона в узлы монолитных зданий с наибольшими теплопотерями – оконные перемычки и монолитные пояса плит перекрытий. Определена степень изученности неавтоклавных газобетонов, а также указаны области, которые необходимо исследовать для дальнейшей работы с подобными конструкциями.

Ключевые слова: неавтоклавный газобетон, энергетическая эффективность, теплопотери, легкий бетон, перемычки, монолитный пояс.

Актуальность вопроса использования легких бетонов в современной строительной отрасли в Российской Федерации обусловлена тем, что перед проектировщиками и строителями стоят задачи повышения энергоэффективности жилищного фонда, снижения энергозатратных показателей в промышленности и строительстве, приоритетного строительства многоквартирных домов, имеющих высокий класс энергоэффективности.

Согласно Федеральному закону от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (далее – Федеральный закон № 261-ФЗ) термическое сопротивление конструкций здания должно соответствовать принятым стандартам по теплозащите, в связи с чем это направление исследований стало приоритетным.

В последние годы изменилась номенклатура выпускаемых промышленностью строительных материалов. Наряду с другими популярными материалами для строительства все более актуальным становится использование газобетона, позволяющее достичь двух целей: снижения массы конструкции здания и повышения энергоэффективности. Газобетон все более востребован при строительстве малоэтажных зданий. В перспективе применение газобетона неавтоклавного твердения (ГНТ) может распространиться на монолитные конструкции в узлах наибольших теплопотерь, что увеличит тепловое сопротивление здания [1].

В рамках реализации Федерального закона № 261-ФЗ использование монолитных конструкций из конструкционного неавтоклавного газобетона, который можно получать непосредственно на строительной площадке, позволит значительно уменьшить теплопотери монолитных зданий [2].

При производстве и использовании монолитных конструкций из неавтоклавного газобетона существует проблема недостаточной изученности возможности повышения прочностных характеристик без значительного уменьшения теплотехнических показателей. Кроме того, необходимо выбрать оптимальный вид арматуры. Для получения материала с плотностью, не превышающей 1800 кг/м^3 , и увеличения коррозионной стойкости наиболее эффективно применять композитную арматуру. При ее использовании в бетонных конструкциях не образуется «мостиков холода» благодаря низкой теплопроводности материала, что позволяет армировать конструкции без ухудшения их теплоизоляционных характеристик.

Неавтоклавный газобетон обладает преимуществами по сравнению с обычным тяжелым бетоном в областях теплоизоляции. Он имеет более высокое сопротивление теплопередаче, что позволяет уменьшить потери тепла через ограждающие конструкции. Пористая структура газобетона обеспечивает высокие шумоизоляционные свойства материала [3].

Наибольшее внимание исследователи пористых бетонов уделяют вопросам армирования силикатных автоклавных бетонов металлической арматурой, для которых выявлена зависимость прочности сцепления от физико-механических характеристик материала и толщины защитного слоя [4].

Для продвижения исследований в области монолитных конструкций из неавтоклавного газобетона необходимо определить оптимальное распо-

ложение подобных элементов (узлов монолитных зданий с наибольшими теплопотерями):

1. Оконных перемычек в ограждающих конструкциях. Эти перемычки относятся к участкам больших теплопотерь (рис. 1), поэтому важно улучшение теплотехнических характеристик материалов, из которых они выполняются. Хотя на рынке строительных конструкций уже имеются крупные производители армированных автоклавных газобетонных перемычек, для возможности ручного производства на строительной площадке необходимо опираться непосредственно на возведение монолитных перемычек нормального твердения с армированием композитной или стальной арматурой.



Рис. 1. Тепловизионная съемка оконных перемычек

2. Монолитных поясов плит перекрытий. Эти участки в монолитных зданиях являются очагом больших теплопотерь, что связано с несовершенством технологий их утепления, а именно использованием термовкладышей или наружного утепления. В обоих случаях утеплитель становится зоной образования конденсата, что сокращает сроки эксплуатации конст-

рукции. При использовании термокладшей остаются «мостики холода» на участках между вкладышами (рис. 2а). При применении же монолитных поясов из неавтоклавного газобетона (рис. 2б) вопросы утепления в значительной степени отпадают сами собой. Поскольку эти участки имеют относительно небольшую площадь, то усилие от нагрузки воспринимается в основном растянутой арматурой, а бетон практически не имеет сжатой зоны, что создает условия для использования бетонов с относительно низкой прочностью на сжатие.

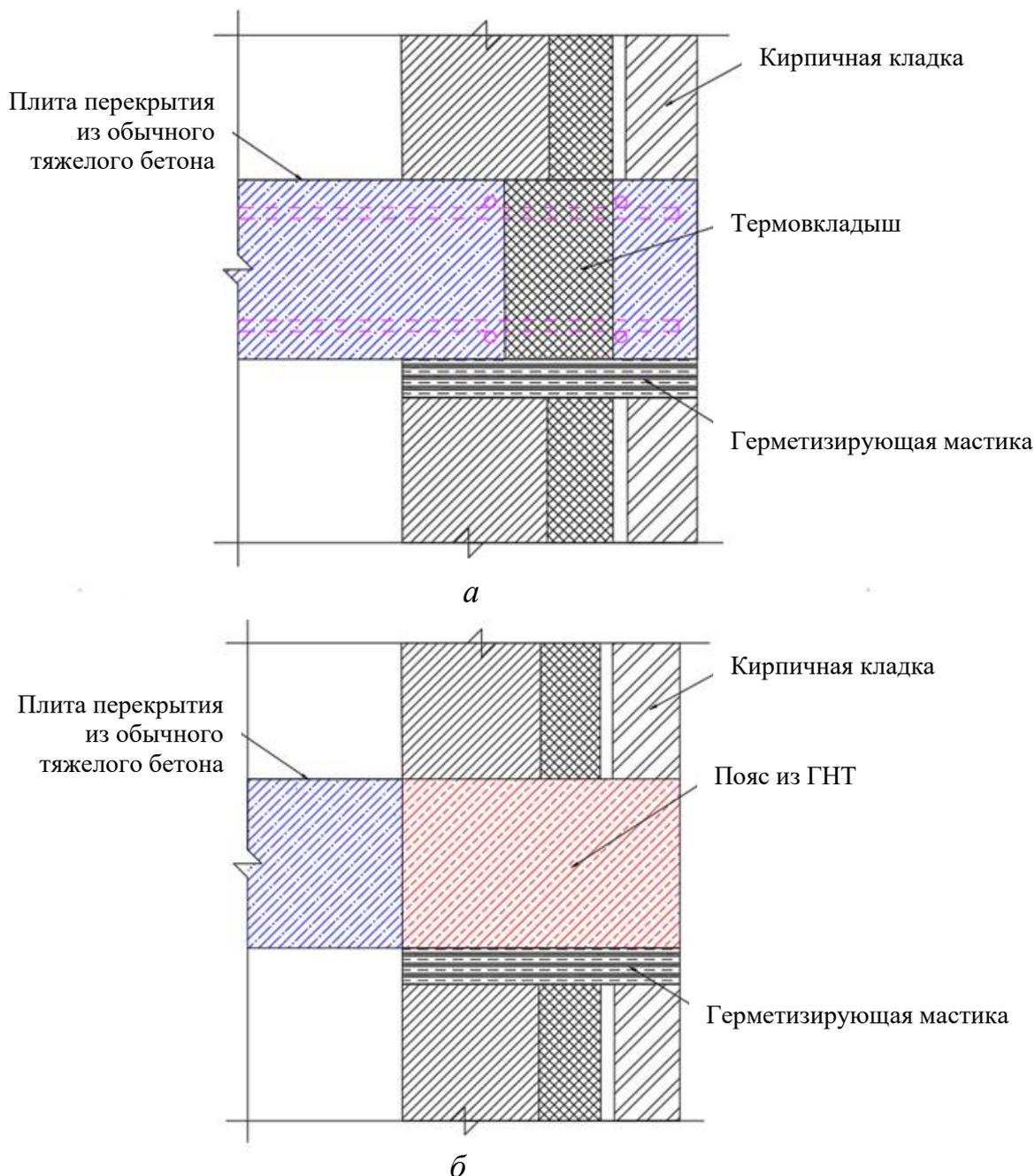


Рис. 2. Устройство монолитного пояса: а – с помощью термокладшей (стандартное утепление); б – из ГНТ

В современных исследованиях неавтоклавнога газобетона, отличающегося от микрoзернистых автоклавных бетонов по структуре и механическим свойствам, рассматриваются в основном вопросы дисперсного армирования. Совместная работа с металлической и особенно композитной арматурой изучены недостаточно, поэтому для расширения использования монолитных конструкций из неавтоклавных газобетонов необходимо уделить особое внимание получению оптимального состава смеси и готовых конструкций на ее основе [5].

Необходимо разработать оптимальный состав для конструкционного неавтоклавнога газобетона, исследовать механические и теплотехнические характеристики полученного материала, а также изучить возможность замены стальной арматуры на композитную для повышения эксплуатационных характеристик; рассмотреть возможность применения стандартных методов расчета железобетонных конструкций для конструктивного газобетона неавтоклавнога твердения и (при необходимости) адаптировать их; изучить вопрос смятия монолитных поясов из газобетона под весом кладки наружных стен при чрезмерном прогибе.

Библиографический список

1. Энергоэффективные неавтоклавные бетоны / А.С. Чкунин [и др.] // Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. М.: НИУ МГСУ, 2017. С. 905–907.

2. Славчева Г.С., Афашагова Я.З., Котова К.С. Перспективы применения неавтоклавных цементных поризованных бетонов в современном строительстве // Научные и инженерные проблемы строительнo-технологической утилизации техногенных отходов: сборник трудов конференции. Белгород: БГТУ, 2014. С. 211–217.

3. Кладиева П.В. Газобетон как перспективный строительный материал // Наука молодых – будущее России: сборник научных статей 4-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых. Курск: ЮЗГУ, 2019. С. 209–212.

4. Векслер М.В., Липилин А.Б. Неавтоклавный пенобетон. Конкуренция с автоклавным газобетоном. URL: <https://www.tpribor.ru/neavtpen.html?ysclid=lmzz96t1jg676657279> (дата обращения: 24.01.2023).

5. Елистраткин М.Ю., Кожухова М.И. Анализ факторов повышения прочности неавтоклавнога газобетона // Строительные материалы и изделия. 2018. Т. 1. № 1. С. 59–68.

APPLICATION OF MONOLITHIC STRUCTURES FROM NON-AUTOCLAVED AERATED CONCRETE.

D.S. Shishaev, T.R. Barkaya, A.D. Shishaeva, M.F. Kotikova

Abstract. The article discusses the possibilities and prospects of using aerated concrete of non-autoclave hardening in monolithic structures erected directly on the construction site. The possibilities of including monolithic aerated concrete in the nodes of monolithic buildings with the greatest heat losses – window lintels and monolithic belts of floor slabs are considered. The degree of study of non-autoclaved aerated concrete is determined, and the areas that need to be investigated for further work with similar structures are also noted.

Keywords: non-autoclaved aerated concrete, energy efficiency, heat loss, lightweight concrete, lintels, monolithic belt.

Об авторах:

ШИШАЕВ Денис Сергеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: shishaevden69@gmail.com

БАРКАЯ Темур Рауфович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: btrs@list.ru

ШИШАЕВА Александра Дмитриевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: shusha.ivanova@gmail.com

КОТИКОВА Мария Федоровна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: m.kotikova77@gmail.com

About the authors:

SHISHAEV Denis Sergeevich – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: shishaevden69@gmail.com

BARKAYA Temur Raufovich – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: btrs@list.ru

SHISHAEVA Alexandra Dmitrievna – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: shusha.ivanova@gmail.com

KOTIKOVA Maria Fedorovna – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: m.kotikova77@gmail.com

ВОЗМОЖНЫЕ ДЕФЕКТЫ И ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИЦЕВОГО СЛОЯ ТЕПЛОЭФФЕКТИВНОЙ КЛАДКИ НАРУЖНЫХ СТЕН

А.Д. Шишаева, С.Г. Яковлев, Д.С. Шишаев

© Шишаева А.Д., Яковлев С.Г.,
Шишаев Д.С., 2023

Аннотация. В статье рассматриваются основные причины возникновения аварийных ситуаций: отсутствие вертикальных деформационных швов в лицевом слое, а также армирования горизонтальных рядов кладки в лицевом слое; облицовка плит перекрытия пиленным кирпичом; многочисленные дефекты при производстве строительномонтажных работ.

Ключевые слова: дефекты кладки, облицовка, деформационный шов, разрушение кладки.

В современном мире приоритетным направлением в строительстве стало монолитное домостроение, для которого характерно применение теплоэффективных самонесущих ограждающих конструкций.

После принятия Федерального закона «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ многие решения ограждающих конструкций перестали соответствовать нормам. Для того чтобы устранить это несоответствие, потребовалось увеличить слой теплоизоляционного материала в многослойных ограждающих конструкциях либо искать более эффективные материалы. В однослойных каменных стенах пришлось бы использовать большее количество материала, что чревато значительным увеличением массы конструкций и трудозатрат. Решением этой проблемы стало применение крупноформатных ячеистых блоков, обладающих относительно небольшой теплопроводностью. Однако данное решение имеет свои недостатки, к которым можно отнести обязательное устройство облицовочного слоя наружной стены и возможность использования только в качестве самонесущих стен при строительстве зданий свыше двух этажей.

Кроме того, вследствие часто допускаемого нарушения строительных технологий такие здания требуют реконструкции через весьма непродолжительное время после сдачи в эксплуатацию.

Основные причины возникновения аварийных ситуаций достаточно широко освещены в технической литературе. К основным

причинам относятся отсутствие вертикальных деформационных швов в лицевом слое, облицовка плит перекрытия пиленным кирпичом, отсутствие армирования горизонтальных рядов кладки в лицевом слое, многочисленные дефекты в строительном-монтажных работах. Разберем каждую из них подробнее.

Отсутствие вертикальных деформационных швов в лицевом слое

В большинстве современных зданий не соблюдаются требования по устройству вертикальных и горизонтальных деформационных швов. Это приводит к возникновению вертикальных трещин в лицевом слое ограждающей конструкции, особенно в угловых зонах здания (рис. 1), а также к выкрашиванию кирпича в зоне дисков перекрытия.



Рис. 1. Трещины в угловых зонах кладки

Вертикальные швы необходимо устраивать таким образом, чтобы их расположение не нарушало целостность стены. В первую очередь они должны располагаться в угловых зонах фасадов, где температурные деформации лицевого кирпича достигают максимальных значений. Деформационные швы в наружных стенах должны исполняться так, чтобы предотвратить попадание атмосферных осадков внутрь здания. Швы должны также компенсировать температурно-влажностные деформации керамического кирпича, которые могут достигать 1 мм/м. Однако на практике толщину деформационного шва принимают большей. Например, при расстоянии между деформационными швами $l_m = 8$ м толщина швов составит 11 мм [1–3]. Максимальное значение расстояния между вертикальными деформационными швами должно приниматься согласно табл. 9.8 СП «Каменные и армокаменные конструкции» в зависимости от изменения температуры:

Изменение температуры	Максимальное значение расстояния между вертикальными деформационными швами в лицевом (наружном) слое
-----------------------	--

$\Delta t_c, ^\circ\text{C}$, по СП 20.13330	кладки наружных стен, м			
	Форма участка стены из керамического кирпича, керамических и природных камней		Форма участка стены из силикатного кирпича, бетонных, ячеистобетонных камней	
	Прямолинейная	L-образная	Прямолинейная	L-образная
80	6,0	3,0	4,0	2,0
60	7,0	3,5	4,6	2,3
40	8,0	4,0	5,4	2,7

Облицовка плит перекрытия пиленным кирпичом

Такое конструктивное решение приводит к быстрому разрушению кирпича при атмосферных воздействиях и сезонных колебаниях температуры (замораживание – оттаивание), повышает риск падения с высоты материалов, используемых для отделки (рис. 2). Его применяют в проектировании в погоне за сиюминутной выгодой, не задумываясь о возможных последствиях. Подобная отделка плит перекрытий не устраняет проблему мостиков холода [5].

В связи с возросшей популярностью энергоэффективной кладки необходимо подробнее изучить вопрос о ее ремонтпригодности.



Рис. 2 Отслоение лицевой кладки

Отсутствие армирования горизонтальных рядов кладки в лицевом слое

В проекте может быть заложено достаточное количество гибких связей, но нет гарантий, что при возведении здания будут соблюдены установленные требования; возможно также использование элементов с низкой коррозионной стойкостью (рис. 3). Такая халатность приводит к деформациям лицевого слоя кладки и повышает вероятность его разрушения данного слоя, а также сокращает срок эксплуатации здания [4].

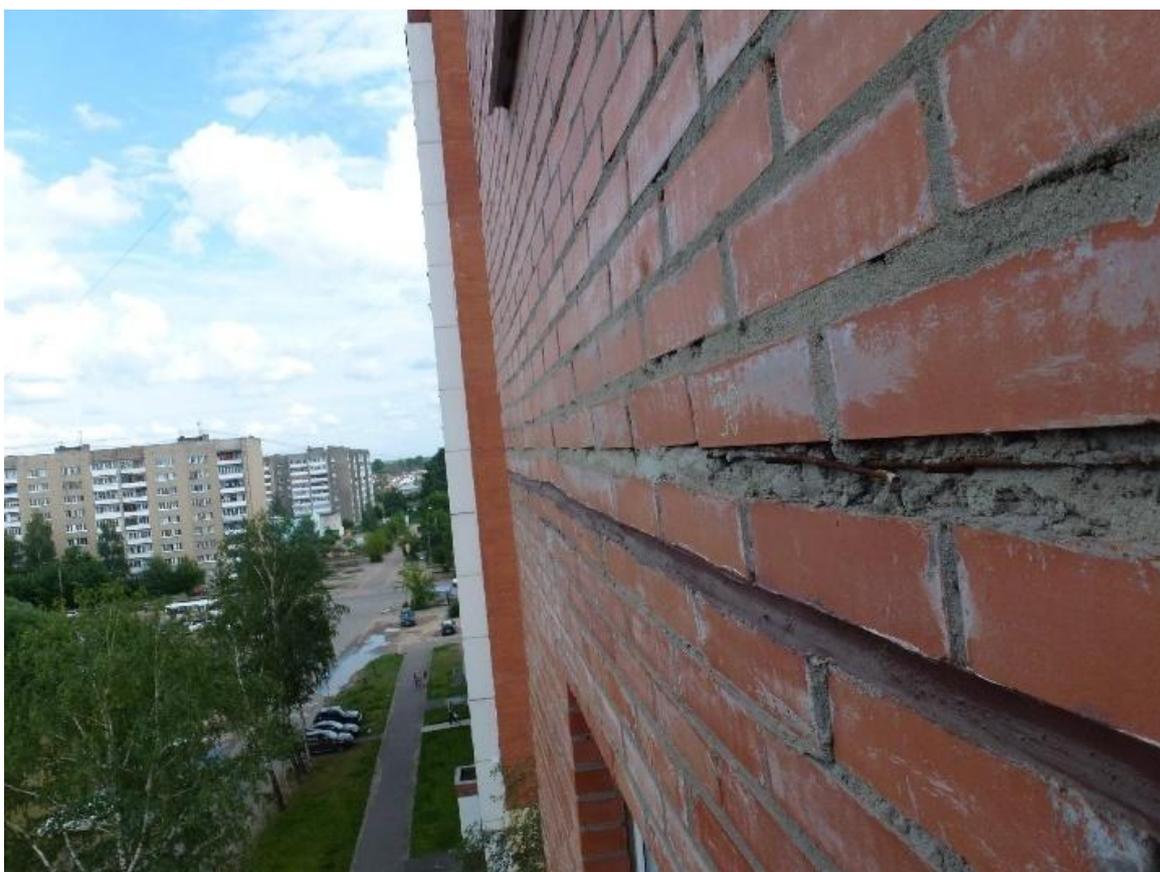


Рис. 3. Использование элементов с низкой коррозионной стойкостью

Многочисленные дефекты в строительно-монтажных работах

К указанным дефектам относят неполное заполнение швов кладки раствором или полное его отсутствие, превышение допустимой толщины швов; неравномерную толщину горизонтальных и вертикальных швов между кирпичами наружного слоя наружных стен, отсутствие защитного покрытия выступающих элементов кладки, отсутствие расшивки шва, отклонение угла кладки от вертикали (рис. 4) [4].

Данные дефекты влияют на прочность, эксплуатационные характеристики стен, безопасность и внешний вид здания.



Рис. 4. Дефекты при строительномонтажных работах

Несмотря на то что теплоэффективная кладка получила широкое распространение для монолитного домостроения в связи с ее дешевизной, несоблюдение установленных норм и правил при проектировании и строительстве может привести к практически неустраняемым дефектам подобного типа стен, нарушающим целостность конструкции и ухудшающим ее качество. К ним относятся вертикальные трещины (особенно на угловых участках стен из-за отсутствия вертикальных деформационных швов); нарушение целостности кладки на торцах плит перекрытия в связи с использованием пиленого кирпича для отделки; деформации лицевого слоя кладки по причине недостаточного количества гибких связей в кладке, а также использование арматуры с низкой коррозионной стойкостью; различные дефекты в швах кладки в связи с некачественным выполнением строительномонтажных работ.

Таким образом, одной из важных задач является разработка новых методов реконструкции подобных конструкций с различными дефектами.

Библиографический список

1. Орлович Р.Б., Зимин С.С., Рубцов Н.М. О расположении вертикальных деформационных швов в каменной облицовке наружных стен каркасно-монолитных зданий // Строительство и реконструкция. 2014. № 3 (53). С. 15–20.

2. Избицкая Ю.С., Калошина С.В., Золотозубов Д.Г. Анализ дефектов и методы ремонта лицевого слоя кирпичной кладки многослойных стен на примере жилого дома в г. Перми // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Серия «Строительство и архитектура». 2019. № 4. С. 40–50.

3. Ищук М.К. Вертикальные температурные швы в стенах с лицевым слоем из каменной кладки // Жилищное строительство. 2018. № 9. С. 54–59.

4. Ремонт кирпичного лицевого слоя в современных каркасно-монолитных домах / Р.Б. Орлович [и др.] // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 8 (23). С. 136–153.

5. Кулешов И.В., Ермолаев Д.А., Борисов Д.В. Проблемы трехслойной кирпичной кладки // Шаг в науку. 2018. № 2. С. 143–147.

POSSIBLE DEFECTS AND DAMAGE TO THE FRONT LAYER OF HEAT-EFFICIENT MASONRY EXTERIOR WALLS

A.D. Shishaeva, S.G. Yakovlev, D.S. Shishaev

***Abstract.** The article discusses the main causes of emergency situations: the absence of vertical deformation seams in the front layer, as well as the reinforcement of horizontal rows of masonry in the front layer; the lining of floor slabs with sawn bricks; numerous defects in the production of construction and installation works.*

***Keywords:** defects of masonry, cladding, deformation seam, destruction of masonry.*

Об авторах:

ШИШАЕВА Александра Дмитриевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: shusha.ivanova@gmail.com

ЯКОВЛЕВ Сергей Геннадьевич – старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: yakovlev-tv@mail.ru

ШИШАЕВ Денис Сергеевич – магистрант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: shishaevden69@gmail.com

About the authors:

SHISHAEVA Alexandra Dmitrievna – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: shusha.ivanova@gmail.com

YAKOVLEV Sergey Gennadievich – Senior Lecturer of the Department of Constructions and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: yakovlev-tv@mail.ru

SHISHAEV Denis Sergeevich – Master's Student, Tver State Technical University, Tver. E-mail: shishaevden69@gmail.com

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Александрова О.В., Булгаков Б.И., Куанг Н.Д.В.</i> ВЛИЯНИЕ ЗОЛЫ-УНОСА НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ БЕТОНА ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА.....	3
<i>Аль-Свейти М.И., Петропавловская В.Б., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б., Бурьянов А.Ф.</i> ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИФИКАТОРА НА СВОЙСТВА ГИПСО-ЗОЛО-ПЕРЛИТОВОГО КАМНЯ	10
<i>Гогаладзе Б.А., Субботин С. Л., Тырин Г.С., Бондарева Ю.С.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРОГРАММНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ.....	22
<i>Гогаладзе Б.А., Субботин С.Л., Тырин Г.С., Бондарева Ю.С.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБАЕМЫХ СТЕРЖНЕЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛЬЮ ПРИ ИЗГИБЕ И ЗАКРУЧИВАНИИ.....	27
<i>Городничев Д.С., Курятников Ю.Ю., Белов В.В., Трофимов В.И.</i> САМОУПЛОТНЯЮЩИЙСЯ БЕТОН НА ОСНОВЕ РЕЦИКЛИНГОВОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ, МОДИФИЦИРОВАННЫЙ КВАРЦЕВОЙ МУКОЙ И ГИПЕРПЛАСТИФИКАТОРОМ.....	33
<i>Джабаров А.С., Белов В.В.</i> СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ АДГЕЗИИ МЕЖДУ РЕМОНТНОЙ БЕТОННОЙ СМЕСЬЮ И БЕТОННЫМ ОСНОВАНИЕМ.....	47
<i>Кондратьев А.В., Кочканян С.М., Павлов Ю.Н., Гусаров А.А., Смородов С.П., Гулийев И.М., Скачков К.А.</i> ВАЛКОВАЯ СОТИРОВКА ДЛЯ ТРУДНОРАЗДЕЛЯЕМЫХ СЫПУЧИХ СМЕСЕЙ.....	55
<i>Кульков С.А., Баранова Е.И.</i> ДЕФЕКТЫ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ.....	61

Кульков С.А., Савич А.В., Лаптев С.Б. ПОЛИУРЕТАНОВЫЕ ИНЪЕКЦИОННЫЕ СОСТАВЫ: ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗАИМОЗАМЕНЯЕМОСТИ С УЧЕТОМ ОПЫТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДРЯДЧИКАМИ.....	68
Малетина Н.С., Соколов С.А., Новиков А.В. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ И ЖЕСТКОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ФОРМЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СООРУЖЕНИЯ.....	75
Новиков А.В., Соколов С.А., Тырин Г.С., Малетина Н.С. ОСОБЕННОСТИ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ...	85
Ткач Е.В., Филимонова Ю.С., Бурьянов А.Ф. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ТЯЖЕЛЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ ПОЛИДИСПЕРСНОГО ВЯЖУЩЕГО ДЛЯ ГИДРОМЕЛИОРАТИВНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА.....	92
Тырин Г.С., Бровкин А.В., Новиков А.В., Гогаладзе Б.А. ОСОБЕННОСТИ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУР, ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СКЛАДОК И ОБОЛОЧЕК.....	102
Ширялин И.М., Бондарь А.А., Лагусева Е.И. ВОЗМОЖНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ СТЕКЛОПОЛНЕННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ С АГРЕССИВНЫМИ ЖИДКИМИ СРЕДАМИ.....	110
Шишаев Д.С., Баркая Т.Р., Шишаева А.Д., Котикова М.Ф. ПРИМЕНЕНИЕ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА.....	114
Шишаева А.Д., Яковлев С.Г., Шишаев Д.С. ВОЗМОЖНЫЕ ДЕФЕКТЫ И ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИЦЕВОГО СЛОЯ ТЕПЛОЭФФЕКТИВНОЙ КЛАДКИ НАРУЖНЫХ СТЕН.....	120

**ИННОВАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ
И ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВЕ**

*Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции
(21 июня 2023 г., Тверь)*

Редактор М.Б. Юдина
Корректор Ю.А. Якушева

Подписано в печать 25.10.2023

Формат 60×84/16

Физ. печ. л. 8

Тираж 50 экз.

Усл. печ. л. 7,44

Заказ № 58

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 6,96

С – 58

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