

УДК 691.33

**ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ТРЕХСЛОЙНЫХ ПОЛИСТИРОЛБЕТОННЫХ ПАНЕЛЕЙ**

**FEATURES OF PHYSICAL AND MECHANICAL TESTS
OF THREE-LAYER POLYSTYRENE CONCRETE PANELS**

В.М. Якимов, А.В. Пермяков, И.Ф. Хафизов, Ф.Ш. Хафизов

**Уфимский государственный нефтяной технический университет,
г. Уфа, Российская Федерация**

**Vladimir M. Yakimov, Arseniy V. Permyakov, Ildar F. Khafizov,
Fanil Sh. Khafizov**

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

e-mail: vlyakm@icloud.com

Аннотация. В статье рассматриваются особенности физических и механических свойств полистиролбетона и изделия, изготовленного на основе данного материала, – трехслойных полистиролбетонных панелей. До настоящего времени специалисты в строительной отрасли рассматривали полистиролбетон как ячеистый бетон, но с более крупными порами, заполненными гранулами полистирола, с демпфирующим эффектом и с меньшей проницаемостью. На самом деле в этом материале реализована двумодельная пористость – крупные поры формируют шарики полистирола, а мелкие – излишки, не вступившие в реакцию с цементом и испаряющейся в дальнейшем воды и микропена – от часто применяемых добавок – пенообразователей. Приведены результаты испытаний: по определению плотности образцов трехслойных полистиролбетонных панелей; на сжатие полистиролбетонных панелей; по определению морозостойкости образцов (ГОСТ 10060.0-95); по определению

теплопроводности образцов (ГОСТ 30256-94); по определению водопоглощения (ГОСТ 12730.3-78), по определению прочности (ГОСТ 10180-2012) и другие. Описан ход проведения экспериментальных исследований, сформулированы выводы, приведены соответствующие рисунки и таблицы. Для проведения исследований были подготовлены образцы с геометрическими размерами: 75 x 75 x 75 мм и 100 x 100 x 100 мм, изготовленные из цельных полистиролбетонных панелей, размеры которых составляют 2800 x 610 x 75 мм и 2800 x 610 x 100 мм. Перед проведением исследований определялись масса, объем, площадь сечения и толщина каждого из образцов. Представлены результаты проведения электронно-микроскопического анализа. Определены щелочные свойства полистиролбетона при воздействии фенолфталеина, о чем свидетельствует появление розового цвета. Все исследования проводились на сертифицированном и поверенном оборудовании в соответствии с требованиями ГОСТ. Также приведено описание полистиролбетона в сравнении с другими материалами. В заключение приведены выводы и рекомендации.

Abstract. The article discusses the physical and mechanical properties of polystyrene concrete and products made on the basis of this material – three-layer polystyrene concrete panels. To date, specialists in the construction industry have considered polystyrene concrete as cellular concrete, but with larger pores filled with polystyrene granules, with a damping effect and with less permeability. A double additive is implemented in this material – large portions form polystyrene balls, and small ones do not form, do not conflict with cement and evaporate as a result of expansion of water and microfoam – from frequently used additives – blowing agents. The test results are as follows: to determine the density of samples of three-layer polystyrene concrete panels; on the compression of polystyrene concrete panels; by definition of frost resistance of samples (State Standard 10060.0-95); by definition of thermal conductivity of samples (State Standard 30256-94); by definition of water absorption (State

Standard 12730.3-78), by definition of strength (State Standard 10180-2012) and others. The course of experimental studies is described, conclusions are formulated, the corresponding figures and tables are given. For research, there were prepared samples with geometric dimensions: 75 x 75 x 75 mm and 100 x 100 x 100 mm, made of solid polystyrene concrete panels, the dimensions of which are 2800 x 610 x 75 mm and 2800 x 610 x 100 mm. Before the studies, the mass, volume, cross-sectional area, and thickness of each of the samples were determined. The results of electron microscopic analysis are presented. The alkaline properties of polystyrene concrete under the influence of phenolphthalein were determined, as evidenced by the appearance of a pink color. All studies were conducted on certified and trusted equipment in accordance with the State Standard requirements. Polystyrene concrete is also described in comparison with other materials. Conclusions and recommendations are given.

Ключевые слова: полистиролбетон; строительные панели; стеновой материал; бетон; прочность; теплопроводность; морозостойчивость

Key words: polystyrene concrete; building panels; wall material; concrete; strength; thermal conductivity; frost resistance

В настоящее время все большее число исследователей сходится в том, что полистиролбетон (ПСБ) – эффективный стеновой материал, отличающийся особым набором прочностных и деформационных свойств. Материал близок к облегченным бетонам по зависимости между плотностью и модулем упругости, по кубиковой и призмочной прочности похож на мелкозернистый или крупнопористый керамзитобетон, к тяжелым бетонам он близок по предельным деформациям сжатия, а макроструктура ПСБ схожа со структурой ячеистого бетона.

Характерной особенностью полистиролбетона в сравнении с другими легкими бетонами на пористых заполнителях является огромное различие между плотностью гранул заполнителя и цементной матрицы.

Для проведения физико-механических испытаний (рисунок 1) подготовлены образцы-кубы полистиролбетонных панелей двух типоразмеров 100 x 100 x 100 мм и 75 x 75 x 75 мм. Размеры цельных полистиролбетонных панелей составляют 2800 x 610 x 75 мм и 2800 x 610 x 100 мм.



Рисунок 1. Подготовка образцов для физико-механических испытаний трехслойных полистиролбетонных панелей

Результаты определения плотности образцов трехслойных полистиролбетонных панелей приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерения плотности образцов

Геометрические размеры образцов, мм	№ образца	Масса образца, г	Объем образца, см ³	Плотность, г/см ³	Среднее значение плотности, кг/м ³
75 x 75 x 75	1	447	421,88	1,06	939,5
	2	355		0,84	
	3	387		0,92	
100 x 100 x 100	1	964	1000,00	0,96	950,0
	2	952		0,95	
	3	934		0,93	

Прочность полистиролбетона может рассматриваться как прочность цементной матрицы с включением в ее объем шарообразных гранул

различных размеров, плотности и прочности. Влияние прочности гранул полистирола на прочность полистиролбетона долгое время не учитывалось. Считалось, что типичный представитель современных легких заполнителей – вспененный полистирол, являясь по физической природе лёгким заполнителем, из-за своей очень малой плотности фактически только формирует макропустотность. Никакого вклада в улучшение прочностных характеристик он практически не вносит. Для него соотношение модуля упругости заполнителя к модулю упругости цементной матрицы близко к нулю – это гораздо хуже, чем даже у лёгкого бетона на основе камыша.

Известно, что для крупнопористых бетонов основным фактором, влияющим на прочность, является количественное содержание вяжущего, а не водовяжущее отношение, как у бетонов слитной структуры. Проведенные исследования доказывают, что на прочность полистиролбетона, как и многих других видов легких бетонов, влияют водовяжущее и водотвердое отношения, а также режимы изготовления и хранения образцов.

Испытания образцов трехслойных полистиролбетонных панелей на сжатие проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 [1] на гидравлическом прессе П-50 и машине на сжатие ИП 6802-100-0. Кубиковая прочность полистиролбетона на сжатие $R_{сж}$ определялась на образцах – кубах размерами 100 x 100 x 100 мм и 75 x 75 x 75 мм. Полученные результаты испытаний полистиролбетонных панелей на сжатие приведены в таблице 2.

При визуальном осмотре поверхности испытанных образцов в месте разрушения материала (рисунок 2) видно, что разрушение ПСБ происходит исключительно по контактному слою цементного камня – заполнитель, обнажая поверхность полистирольного зерна и плотной растворной части межзернового пространства.

Таблица 2. Результаты испытаний ПСБ панелей на сжатие

Размер образца, мм	№ образца	Площадь сечения образца S, см ²	Разрушающая сила, кН	Разрушающая сила F, кгс	Предел прочности при сжатии R _{сж} , кг/см ²	Среднее значение R _{ср} , кг/см ²	Класс прочности
75 x 75 x 75	1	56,25	16,3	1662,14	29,55	37,83	В3
	2		22,9	2335,15	41,51		
	3		23,4	2386,14	42,42		
100 x 100 x 100	1	100,00	38,9	3966,69	39,67	37,70	В3
	2		38,5	3925,91	39,26		
	3		33,5	3416,05	34,16		



Рисунок 2. Образцы панелей после испытания на сжатие

Это говорит о том, что адгезионное сцепление цементного камня с поверхностью полистирольного зерна незначительное, в данном случае вклад в прочность материала вносят высокая гладкость поверхности контактного слоя цементного камня, образованная в результате обволакивания бетонной смеси гранул полистирола, а также наличие обшивки из стекломагнезитовых листов.

На рисунке 3 отображены результаты испытаний образцов на сжатие размерами 75 x 75 x 75 мм и 100 x 100 x 100 мм.

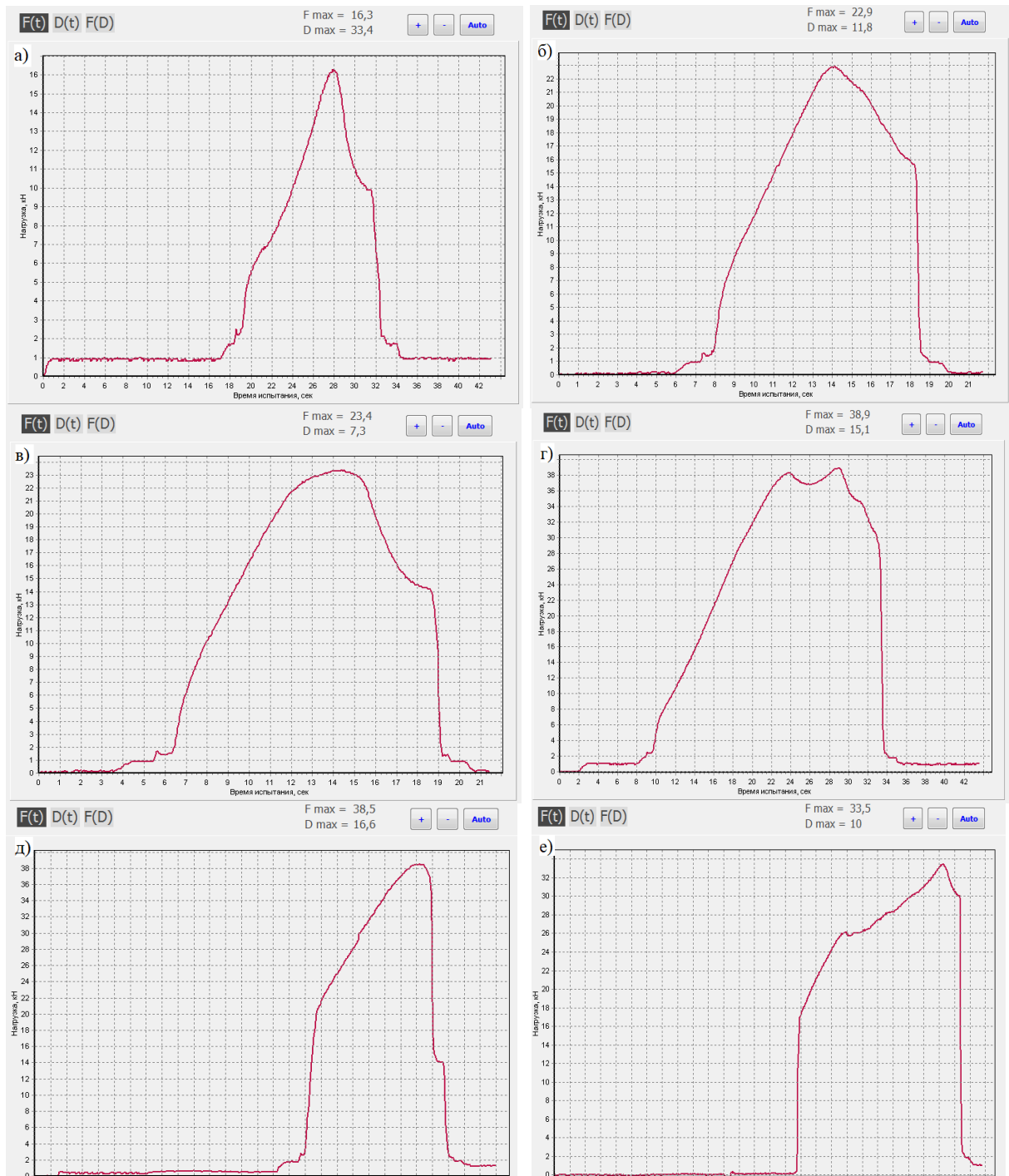


Рисунок 3. Результаты испытаний на сжатие образцов размерами 75 x 75 x 75 мм (а, б, в) и 100 x 100 x 100 мм (г, д, е)

Оценку морозостойкости, согласно ГОСТ 10060.0-95 [2], проводили по снижению прочности образцов на сжатие после 25 и 50 циклов замораживания-оттаивания по формулам:

$$R_{25} = \frac{F_1 - F_2}{F_1} \cdot 100; \quad R_{50} = \frac{F_1 - F_3}{F_1} \cdot 100, \quad (1)$$

где R_{25} , R_{50} – морозостойкость образцов после 25 и 50 циклов замораживания-оттаивания соответственно, %;

F_1 – прочность на сжатие водонасыщенного образца, кН;

F_2 – прочность на сжатие водонасыщенного образца после 25 циклов замораживания-оттаивания, кН;

F_3 – прочность на сжатие водонасыщенного образца после 50 циклов замораживания-оттаивания, кН.

По результатам испытаний устанавливают марку по морозостойкости, которая обозначается F25 или F50 и означает, что изделие выдерживает 25 или 50 циклов последовательного замораживания-оттаивания соответственно. Для определения морозостойкости была использована морозильная камера КМ-0,19.

Перед исследованием образцы насыщали водой. Замораживание проводили в течение 2 ч при температуре минус 20 °С, а размораживание – также в течение 2 ч в сосуде с водой при температуре 20 °С. Результаты испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты испытаний полистиролбетонных панелей на морозостойкость

Толщина панелей, мм	Прочность образцов на сжатие, кН			Морозостойкость		Марка по морозостойкости
	после водонасыщения	после замораживания-оттаивания				
		25 циклов	50 циклов	R_1	R_2	
75	17,63	12,80	13,87	27,40	21,33	< F25
100	40,10	38,89	38,73	3,02	3,42	F50

Анализ данных таблицы 3 позволяет сделать следующие выводы:

1) панель толщиной 100 мм имеет высокую морозостойкость, превышающую значение F50, и поэтому может быть рекомендована к применению в климатических условиях средней полосы и севера России во внешнем слое многослойных наружных стен зданий;

2) панель толщиной 75 мм имеет низкую морозостойкость (ниже F25) и может применяться для устройства как внутреннего слоя многослойных

наружных стен, так и для внутренних стен и перегородок в отапливаемых помещениях.

В соответствии с ГОСТ 30256-94 [3], измерение теплопроводности производится с помощью теплового цилиндрического зонда постоянной электрической мощности нагрева по изменению его температуры за определенный интервал времени. Результаты измерений коэффициента теплопроводности среднего слоя панелей приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты испытаний среднего слоя панелей на теплопроводность

Элемент панели	Толщина панели, мм	№ образца	Коэффициент теплопроводности, К (Вт/м·К)	
			K_i	K_{cp}
Средний слой	75	1	0,425	0,406
		2	0,384	
		3	0,410	
	100	1	0,284	0,293
		2	0,259	
		3	0,335	

Теплопроводность среднего слоя образцов композиционных панели толщиной 100 мм (0,293 Вт/м·К) на 39 % ниже, чем теплопроводность среднего слоя панелей толщиной 75 мм (0,406 Вт/м·К).

Согласно ГОСТ [4], испытания по определению водопоглощения по массе проводятся путем взвешивания образцов в сухом и водонасыщенном состоянии. При этом для полного водонасыщения образцы необходимо выдержать в сосуде с водой в течение суток, после чего проводится повторное взвешивание образцов. Результаты испытаний приведены в таблице 5.

Водопоглощение по массе рассчитывается как отношение массы поглощенной материалом воды к массе сухого материала m :

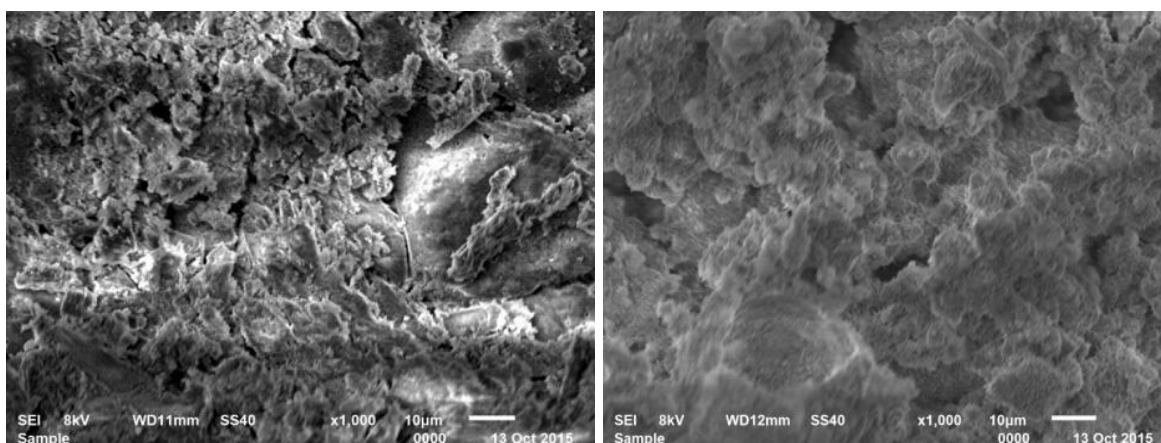
$$\beta_m = \frac{m_n - m}{m} \cdot 100\% , \quad (2)$$

где m_n – масса водонасыщенного образца.

Таблица 5. Результаты определения водопоглощения панелей

Геометрические размеры образцов	№ образца	Масса образца, кг				Водопоглощение по массе, %
		сухого		насыщенного водой		
		m_i	m^{cp}	m_{ni}	m_n^{cp}	
75 x 75 x 75	1	0,447	0,396	0,487	0,432	8,19
	2	0,355		0,381		
	3	0,387		0,427		
100 x 100 x 100	1	0,964	0,95	1,015	1,001	5,06
	2	0,952		1,002		
	3	0,934		0,985		

Данные проведенного электронно-микроскопического анализа свидетельствуют о том, что цементный камень в образцах типа I имеет существенно более плотную и однородную структуру, чем в образце типа II (рисунок 4).



a)

б)

Рисунок 4. Электронно-микроскопический снимок поверхности скола образцов типа I (а) и типа II (б) (увеличение x 1000)

После определения состава цементного камня образцов были оценены степень и скорость карбонизации образца заводского производства (образец типа I) [5]. При воздействии углекислого газа воздуха цементный камень карбонизируется за счет взаимодействия гидроксида кальция с углекислым газом воздуха CO_2 по реакции $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3$. Степень карбонизации среднего слоя панелей после их длительной эксплуатации в

атмосферных условиях (8 лет) определялась по реакции индикатора – раствора фенолфталеина (рисунок 5). Для этого образец был распилен, а поверхность раздела увлажнена и обработана фенолфталеином.

О наличии щелочных свойств при действии фенолфталеина свидетельствует появление розового цвета, тогда как цементный камень, подвергшийся карбонизации, сохраняет свою первоначальную окраску.

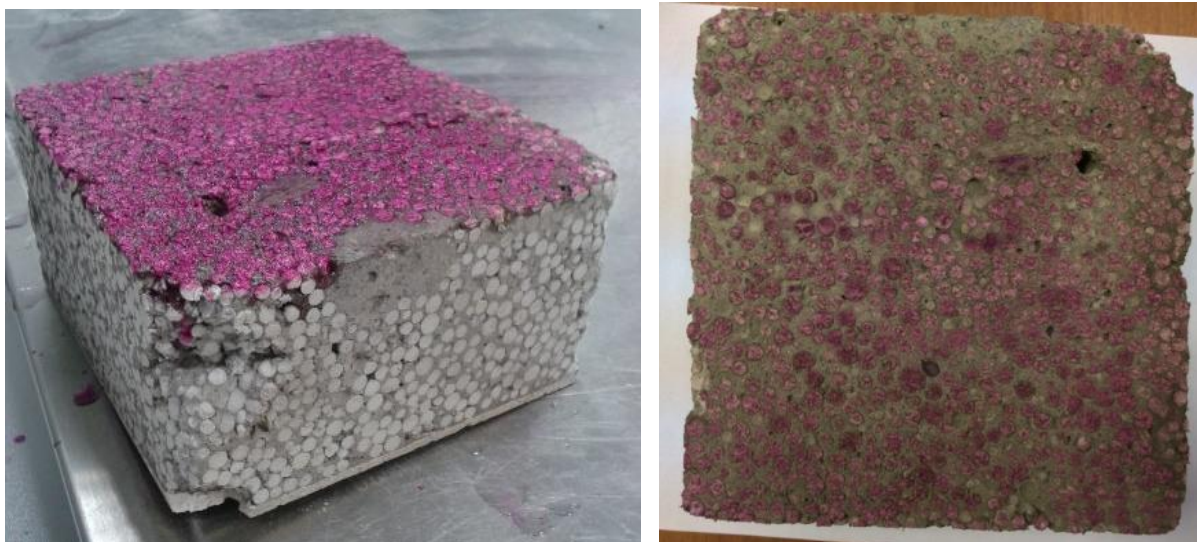


Рисунок 5. Обработка образца типа I фенолфталеином

Цементный камень в образце типа I подвергся карбонизации на всю толщину образца. В свою очередь, полистирольные гранулы на срезе сохранили щелочную среду, на что указывает розовый оттенок гранул. Это связано с «захватом» щелочей цемента гранулами полистирола, что оказывает некоторый короткий по длительности (не более 1 мес.) эффект сохранения карбонизированным ПСБ щелочных свойств [6].

Выводы

На основе анализа литературных данных [7–10], опыта исследований свойств полистиролбетона российскими и зарубежными учеными в течение более сорока лет, анализа состояния эксплуатирующихся объектов установлено, что основным недостатком трехслойных панелей со средним

слоем из полистиролбетона является их повышенная деформативность, приводящая к снижению долговечности этих изделий. Это обусловлено малой прочностью среднего слоя из полистиролбетона (не более 3,8 МПа при плотности 950 кг/м³). В связи с этим основным способом повышения эффективности трехслойных полистиролбетонных панелей является улучшение физико-механических характеристик среднего слоя из полистиролбетона.

Целесообразно продолжение исследований в области совершенствования конструкции сэндвич-панелей с добавлением в их средний слой стеклопластиковой арматуры, способной увеличить показатели по прочности (для изгибаемых конструкций перекрытий и покрытия). Данное решение повысит конкурентоспособность и сферу применения трехслойных полистиролбетонных панелей.

Рекомендуется введение в ГОСТ 33929-2016 «Полистиролбетон. Технические условия» дополнительного вида полистиролбетона – «конструкционный» с маркой по средней плотности D650-D1000 и классом по прочности на сжатие выше В2.5.

Список используемых источников

1. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: НИИЖБ, 2013. 36 с.
2. ГОСТ 10060.0-95. Бетоны. Методы определения морозостойкости. Общие требования. М.: НИИЖБ, 1996. 13 с.
3. ГОСТ 30256-94. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом. М.: НИИЖБ, 1996. 20 с.
4. ГОСТ 12730.3-78. Бетоны. Методы определения водопоглощения. М.: НИИЖБ, 1994. 4 с.

5. Владимирцев Е.М., Ступалов Д.Ю., Якимов В.М., Кривцов С.И., Латыпов В.М., Климин В.Н. Применение панелей «Wallsaving» в ограждающих конструкциях зданий // Инженерные системы в строительстве и коммунальном хозяйстве. 2015. № 2. С. 16-18.

6. Нугуманов Д.Р., Якимов В.М., Дербинян Г.К., Латыпов В.М. Исследование состава и структуры среднего слоя композиционных панелей тонкими методами анализа // Актуальные проблемы технических, естественных и гуманитарных наук. 2015. С. 96-98.

7. Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушений. М.: Стройиздат, 1982. 196 с.

8. Парфенов В.Г. Исследование и разработка ресурсо- и энергосберегающих композиционных теплоизоляционных материалов на основе пенополистирола: дис. ... канд. техн. наук. Тюмень: ТюмГНГУ, 2000. 127 с.

9. Ложкин В.П., Пазоев З.А. Производство теплоизоляционного пенополистирола с использованием промышленных отходов // Строительные материалы. 1992. №4. С. 14.

10. Гейданс И.У. Исследование способов облегчения теплоизоляционно-конструкционных стеновых материалов: применительно к строительству в отдаленных районах: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГУ, 1974. 169 с.

References

1. *GOST 10180-2012. Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nyy obraztsam* [State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for Strength Determination Using Reference Specimens]. Moscow, NIIZhB Publ., 2013. 36 p. [in Russian].

2. *GOST 10060.0-95. Betony. Metody opredeleniya morozostoikosti. Obshchie trebovaniya* [State Standard 10060.0-95. Concretes. Methods for the Determination of Frost-Resistance. General Requirements]. Moscow, NIIZhB Publ., 1996. 13 p. [in Russian].

3. *GOST 30256-94. Materialy i izdeliya stroitel'nye. Metod opredeleniya teploprovodnosti tsilindricheskim zondom* [State Standard 30256-94. Building Materials and Products. The Method of the Thermal Conductivity Determination by a Cylindrical Probe]. Moscow, NIIZhB Publ., 1996. 20 p. [in Russian].

4. *GOST 12730.3-78. Betony. Metody opredeleniya vodopogloshcheniya* [State Standard 12730.3-78. Concretes. Method of Determination of Water Absorption]. Moscow, NIIZhB Publ., 1994. 4 p. [in Russian].

5. Vladimirtsev E.M., Stupalov D.Yu., Yakimov V.M., Krivtsov S.I., Latypov V.M., Klimin V.N. *Primenenie paneli «Wallsaving» v ograždayushchikh konstruktsiyakh zdaniy* [Application of Wallsaving Panels in Building Envelopes]. *Inzhenernye sistemy v stroitel'stve i kommunal'nom khozyaistve – Engineering Systems in Construction and Public Utilities*, 2015. No. 2, pp. 16-18. [in Russian].

6. Nugumanov D.R., Yakimov V.M., Derbinyan G.K., Latypov V.M. *Issledovanie sostava i struktury srednego sloya kompozitsionnykh paneli tonkimi metodami analiza* [Study of the Composition and Structure of the Middle Layer of Composite Panels Using Thin Analysis Methods]. *Aktual'nye problemy tekhnicheskikh, estestvennykh i gumanitarnykh nauk – Actual Problems of Technical, Natural and Human Sciences*, 2015, pp. 96-98. [in Russian].

7. Zaitsev Yu.V. *Modelirovanie deformatsii i prochnosti betona metodami mekhaniki razrushenii* [Modeling of Deformations and Concrete Strength Using Fracture Mechanics]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1982. 196 p. [in Russian].

8. Parfenov V.G. *Issledovanie i razrabotka resurso- i energosberegayushchikh kompozitsionnykh teploizolyatsionnykh materialov na osnove penopolistirola: dis. kand. tekhn. nauk* [Research and Development of Resource- and Energy-Saving Composite Thermal Insulation Materials Based on Polystyrene Foam: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Tyumen: TyumGNGU Publ., 2000. 127 p. [in Russian].

9. Lozhkin V.P., Pazoev Z.A. *Proizvodstvo teploizolyatsionnogo penopolistirola s ispol'zovaniem promyshlennykh otkhodov* [Production of Thermal Insulation Polystyrene Foam Using Industrial Waste]. *Stroitel'nye materialy – Stroitel'nye Materialy (Construction Materials)*, 1992, No. 4, pp. 14. [in Russian].

10. Geidans I.U. *Issledovanie sposobov oblegcheniya teploizolyatsionno-konstruktsionnykh stenovykh materialov: primenitel'no k stroitel'stvu v otdalennykh raionakh: dis. kand. tekhn. nauk* [The Study of Ways to Facilitate Thermal Insulation and Structural Wall Materials: in Relation to Construction in Remote Areas: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Moscow, MGU Publ., 1974. 169 p. [in Russian].

Сведения об авторах

About the authors

Якимов Владимир Михайлович, аспирант кафедры «Пожарная промышленная безопасность», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Vladimir M. Yakimov, Post-graduate Student of Fire and Industrial Safety Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: vlyakm@icloud.com

Пермяков Арсений Владимирович, старший преподаватель кафедры «Пожарная и промышленная безопасность», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Arseniy V. Permyakov, Senior Lecturer of Fire and Industrial Safety Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: senya2512@yandex.ru

Хафизов Ильдар Фанилевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Пожарная и промышленная безопасность», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Ildar F. Khafizov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Fire and Industrial Safety Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: pkpb@mail.ru

Хафизов Фаниль Шамилевич, д-р техн. наук, профессор кафедры «Пожарная и промышленная безопасность», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Fanil Sh. Khafizov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Fire and Industrial Safety Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: pkpb@mail.ru