Строительные материалы и изделия

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-13>
УДК 691.327

Г.С. Славчева, Т.К. Буймарова

СЛАВЧЕВА ГАЛИНА СТАНИСЛАВОВНА – д.т.н., профессор, SPIN: 2538-5440,
Researcher ID: U-4421-2018, ORCID: 0000-0001-8800-2657, Scopus ID:
57195684636, e-mail: gslavcheva@yandex.ru
БУЙМАРОВА ТАТЬЯНА КОНСТАНТИНОВНА – аспирант, e-mail: buimarova@mail.ru
Воронежский государственный технический университет
Воронеж, Россия

Физико-климатическая стойкость пенобетонов на основе техногенного сырья

Аннотация: Представлены результаты экспериментальной оценки параметров физико-климатической стойкости цементных пенобетонов. В экспериментах оценивались показатели и комплекс физико-технических свойств (как функция) влажностного состояния. В исследованиях использованы стандартные методики испытаний свойств. Установлено, что неавтоклавные цементные пенобетоны на основе неорганических техногенных наполнителей характеризуются показателями водостойкости, влажностной усадки, морозостойкости, теплопроводности на уровне нормативных требований к ячеистым бетонам соответствующей плотности. Поэтому можно прогнозировать, что их физико-климатическая стойкость соответствует требованиям, необходимым для эксплуатации в ограждающих конструкциях. Показано, что для повышения физико-климатической стойкости цементных пенобетонов требуется, чтобы параметры состава и структуры обеспечивали их возможно меньшую восприимчивость к влажностным воздействиям. К таким приоритетным параметрам следует отнести дисперсность и смачиваемость поверхности наполнителей, а также структуру пористости пенобетонов, определяемую и характеристиками наполнителей, и водотвердым отношением в пенобетонной смеси.

Ключевые слова: пенобетон, техногенные наполнители, влажность, прочность, водостойкость, усадка, морозостойкость, теплопроводность.

Введение

Утилизация техногенных отходов – важнейший фактор для увеличения эффективности современных промышленных производств и сохранения сырьевой базы. Его использование при производстве строительных композитов потенциально позволит удовлетворить до 50% потребностей строительной индустрии в сырье. Одно из эффективных направлений – применение техногенных отходов в качестве наполнителей или заполнителей для различных видов бетонов. В этом случае они могут применяться практически без переработки, что позволит снизить себестоимость конечного продукта.

В частности, один из видов бетонов, где техногенные наполнители могут эффективно применяться, – неавтоклавный цементный пенобетон. Перспективность данного

направления [7, 8, 12] определяется в совокупности следующими возможностями:

- использование техногенных наполнителей вместо природного песка в их естественном состоянии с исключением дополнительных технологических переделов подготовки,
- возможность реализации технологического процесса на мобильных установках.

В настоящее время доказана возможность получения на основе широкой гаммы техногенных наполнителей разновидностей пенобетонов, уровень физико-механических свойств которых соответствует нормативным требованиям. В частности, имеется научный и практический опыт получения пенобетонов с использованием отходов в качестве наполнителей различного химико-минералогического состава и дисперсности:

- неорганических мелкодисперсных (отходов камнедробления, металлургических отходов [3, 5, 15]),
- неорганических микродисперсных зол-уноса [1, 14, 16, 17],
- неорганических ультрадисперсных (микрокремнезема, микросфер [2, 4, 6, 9, 18]),
- органических мелкодисперсных (резиновой крошки [10]).

В большинстве исследований основное внимание уделяется вопросам формирования ячеистой структуры пенобетонной смеси, структурообразования и твердения полученных композитов, а также проблеме обеспечения нормируемого уровня их физико-механических свойств на момент изготовления. Подчеркнем, что пенобетон как конструкционно-теплоизоляционный материал используется, как правило, в ограждающих конструкциях, основным фактором деструкции которых являются физико-климатические воздействия.

Из факторов внешней среды, вызывающих изменение свойств строительных материалов при эксплуатации в ограждающих конструкциях, наиболее сильно действующим может считаться влажностный фактор. Поэтому от интенсивности развития процессов увлажнения–высыхания, достигаемой равновесной влажности зависит реализация основных свойств материалов. Эксплуатационной влажностью определяется изменение прочности материалов (эффект Ребиндера), развитие влажностных деформаций, изменение теплопроводности, морозостойкость. Однако за исключением отдельных работ [6, 9], физико-климатической стойкости пенобетонов не уделяется должного внимания.

Цель настоящей статьи – оценка параметров физико-климатической стойкости цементных пенобетонов на основе комплексной диагностики их конструкционных свойств как функции влажности.

Для этого нам необходимо:

- провести серию экспериментов, чтобы установить закономерности изменения свойств цементных пенобетонов на основе техногенного сырья в зависимости от изменения их влажности,
- обосновать требования к параметрам состава и структуры пенобетонов, обеспечивающих снижение вариативности уровня свойств при изменении влажности.

Методика исследований

Эксперименты проводились в Воронежском государственном техническом университете в 2019 г.

Исследования выполнены для бетонов $\rho = 800\text{--}1000 \text{ кг/м}^3$ на молотом песке (эталонные составы) и техногенных наполнителях. В экспериментах для всех видов пенобетона использовались образцы с соотношением по массе цемента (Ц) и наполнителей (Н) – Ц : Н = 1 : 1,75. Водотвердое отношение назначалось исходя из условия обеспечения одинаковой подвижности бетонной смеси. Требуемая средняя плотность бетонной смеси и бетона достигалась изменением дозировки воздухововлекающей добавки «Пеностром» в пределах 0,15–0,20 % от массы твердой фазы при 10% концентрации ее раствора (табл. 1).

В опытах использовались портландцемент СЕМ I 42,5R, в качестве наполнителей применялись песок молотый, карбонаткальцевая пыль-уноса цементного производства, кислая зола-уноса ТЭЦ (табл. 2).

Таблица 1

Характеристика составов пенобетона

Наименование характеристик	Вид пенобетона					
	на молотом песке		на золе-уноса		на пыли-уноса	
Марка по средней плотности	D800	D1000	D800	D1000	D800	D1000
В/Т	0,45	0,45	0,63	0,63	1,00	1,00
Дозировка ПАВ, % от массы цемента	0,18	0,12	0,20	0,15	0,19	0,17

Таблица 2

Характеристика наполнителей

Наполнитель	Удельная площадь поверхности, м ² /г	Средний эквивалентный диаметр, мкм	Теплота смачивания поверхности водой, кДж/кг	Интегральная оценка по K _{осн}
Песок	150	65	0,97	0,03 кислое сырье
Пыль-уноса	120	55	2,77	3,32 ультраосновное сырье
Зола-уноса	300	25	1,83	-0,17 ультракислое сырье

Приготовление пенобетонной смеси производилось в смесителе турбинного типа, скорость перемешивания составляла 900 об/мин, продолжительность перемешивания – 4 мин. После приготовления контролировалась плотность пенобетонной смеси, затем производилось формование образцов для испытаний заданных групп свойств.

Для всех видов бетона оценивались показатели влажностного состояния (равновесная эксплуатационная влажность, водопоглощение), прочность при сжатии, влажностная усадка, теплопроводность и морозостойкость. Определение перечисленных характеристик производилось по стандартным методикам, регламентированным для ячеистых бетонов (ГОСТ 12730.2-78, ГОСТ 7076-99, ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 27005-2014, ГОСТ 25485-2019). Прочностные характеристики образцов пенобетона оценивались через 28 сут их твердения в нормальных температурно-влажностных условиях, в высушенном до постоянной массы, водонасыщенном в течение 72 ч состоянии.

Определение коэффициента теплопроводности пенобетона в состоянии равновесной влажности после твердения в нормальных условиях и в высушенном до постоянной массы состоянии проводилось на приборе «ИТС-1» для оперативного неразрушающего контроля теплофизических свойств твердых строительных материалов.

Результаты и их обсуждение

По результатам исследований (табл. 3) установлено, что уровень свойств всех разновидностей цементных пенобетонов соответствует требованиям ГОСТ 25485-2019. По величине влагосодержания в равновесном и водонасыщенном состоянии пенобетон на кварцевом песке по сравнению с бетонами на пыли-уноса и золе-уноса характеризуется самыми низкими значениями оцениваемых характеристик. И это вполне объяснимо, так как песок характеризуется меньшей смачиваемостью поверхности частиц водой, а межпоровые перегородки должны характеризоваться минимальной микропористостью вследствие низких значений В/Т (табл. 1).

С точки зрения влияния влажностного состояния пенобетона на его свойства установлено следующее.

Более высокой водостойкостью, оцененной по коэффициенту размягчения K_p , характеризуется бетон на кварцевом песке, нежели бетоны на техногенном сырье. Однако показатели водостойкости бетона на золе-уноса практически не уступают данным характеристикам

для бетонов на песке. Сравнительно низкие показатели K_p пенобетона на пыли-уноса обусловлены большей его активностью по отношению к воде по сравнению с бетоном на песке. Это связано, как отмечалось выше, с лучшей смачиваемостью водой карбонаткальцевого наполнителя по сравнению с кварцевым.

Таблица 3

Свойства конструкционно-теплоизоляционного пенобетона

Показатели свойств	Виды пенобетона					
	на молотом песке		на золе-уноса		на пыли-уноса	
	D1000	D800	1000	800	D1000	D800
Прочность при сжатии $R_b^{сж}$, МПа	4,5	3,2	5,9	3,5	3,7	2,6
Коэффициент размягчения $K_p = R_b^{водонасыщ} / R_b^{сж}$	0,86	0,81	0,82	0,80	0,77	0,75
Водопоглощение, %	11,2	13,1	15,8	21,18	25,0	28,5
Равновесная влажность, %	5,7	5,9	6,3	6,9	7,2	8,0
Деформации влажностной усадки в эксплуатационном диапазоне высыхания ϵ , мм/м	1,5	1,7	2,1	2,2	2,3	2,4
Марка по морозостойкости	50	50	35	35	35	35
Коэффициент теплопроводности при влажности, Вт/м ⁰ С	W = 0	0,24	0,16	0,21	0,16	0,22
	W = 6–8%	0,29	0,21	0,28	0,20	0,22

В эксплуатационном диапазоне изменения влажности деформация усадки образцов бетона на пыли-уноса и золе-уноса оказалась в 1,5–1,7 раза выше, чем у бетона на песке, рассматриваемого в качестве эталона. Оценка показателей влажностного состояния дает основание квалифицировать бетоны на основе техногенных наполнителей как материалы с большей силой его связи с водой. Поэтому при обезвоживании они характеризуются более высокими показателями влажностной усадки по сравнению с бетоном на песке.

Результаты исследований усадки бетонов позволяют заключить, что ее величина прямым образом соотносится с видом и дисперсностью применяемого наполнителя. Из анализа механизма усадки известно, что определяющим ее «носителем» является цементирующее вещество, а частицы наполнителя, выполняя каркасообразующую функцию, стесняют и сдерживают проявление материалом объемных изменений. Если считать, что для рассматриваемых в настоящих исследованиях видов пенобетона параметры состава и структуры новообразований не могут значительно различаться, то можно исходить из того, что в данном конкретном эксперименте только характеристики наполнителя будут изменять величину влажностной усадки материала.

Если проследить за особенностями развития влажностных деформаций пенобетона (см. рисунок), то для бетона всех исследуемых серий характерно отсутствие усадочных деформаций при удалении первых порций воды. Размер макропор в исследуемых образцах бетона таков, что их освобождение от воды не сопровождается высвобождением сколько-нибудь заметных сил связи структуры материала с водой. Поэтому и существенных объемных изменений материала не происходит.

Степень деформирования различных видов бетона заметно различается. Для пенобетона на песке и пыли-уноса наибольшая усадка наблюдается в эксплуатационном диапазоне обезвоживания (до 60–70% ее полной величины); для бетона на золе-уноса почти 50% усадочных деформаций развивается при глубоком обезвоживании, при $t = 105 \pm 5$ °С и $W = 0$. Для всех рассмотренных видов пенобетонов при уменьшении средней плотности и, соответственно, увеличении объемной доли величина усадочных деформаций несколько возрастает. Это может быть объяснено снижением сопротивляемости деформированию пенобетона при увеличении его пористости.

Кривые влажностной усадки пенобетонов марки по средней плотности D800 на различных видах наполнителей.

Морозостойкость пенобетонов на основе техногенных наполнителей также оказалась на одну марку ниже, чем для бетонов на кварцевом песке, что закономерно обусловлено почти в 2 раза более высоким водопоглощением.

Важным при оценке зависящих от влажности свойств бетона является рассмотрение показателей теплопроводности. Для теплопроводности во влажном состоянии важным остается распределение пор по размерам, так как это определяет форму связи, содержание влаги в материале. Равновесная эксплуатационная влажность пенобетонов составляет 6–8% и определяется наличием в структуре капиллярно-связанной воды, которая играет роль тепловых мостиков в теплопередаче. Поэтому величина коэффициента теплопроводности для всех видов бетона в состоянии равновесной эксплуатационной влажности больше на 20–30%, чем в сухом состоянии. Подчеркнем: увеличение теплопроводности бетонов на техногенном сырье не превышает такое увеличение для бетонов на песке.

На основании полученных результатов мы можем сделать следующие выводы о влиянии параметров состава и структуры на меру вариативности свойств пенобетонов при изменении их влажности. Дисперсность и активность по отношению к воде наполнителей влияет на количество воды затворения (значение В/Т-отношения), обеспечивающее необходимую для поризации консистенцию бетонной смеси. В результате изменяется структура пористости пенобетона – повышение В/Т приводит к преобладанию микропор в его структуре [11, 13]. Одновременно высокая дисперсность и активность по отношению к воде наполнителей в сформированной структуре пенобетона способствует повышению активности поверхности его твердой фазы по отношению к воде [11, 13].

Данные факторы в совокупности определяют увеличение силы связи структуры пенобетона с водой, что может привести к повышению водопоглощения и величины усадочных деформаций, а также к снижению водостойкости и морозостойкости. Поэтому для обеспечения физико-климатической стойкости пенобетонов при оптимизации их составов необходимо учитывать характеристики наполнителей.

Заключение

1. Неавтоклавные цементные пенобетоны на основе неорганических техногенных мелко- и микродисперсных наполнителей характеризуются показателями водостойкости, влажностной усадки, морозостойкости, теплопроводности на уровне нормативных требований к ячеистым бетонам соответствующей плотности, поэтому можно прогнозировать, что их физико-климатическая стойкость соответствует требованиям, необходимым для их эксплуатации в ограждающих конструкциях.

2. Для повышения физико-климатической стойкости цементных пенобетонов необходимо, чтобы параметры состава и структуры обеспечивали их возможно меньшую восприимчивость к влажностным воздействиям. К таким приоритетным параметрам следует отнести дисперсность и смачиваемость поверхности наполнителей, а также структуру пористости пенобетонов, определяемую и характеристиками наполнителей, и В/Т-отношением в пенобетонной смеси.

3. Развитие исследований связано с вопросами оптимизации технологических условий получения пенобетонов на основе техногенного сырья с заданными физико-механическими свойствами и показателями физико-климатической стойкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асаналиева Ж.Д. Неавтоклавный пенобетон на основе наполнителей из вторичных материалов и промышленных отходов // *Academy*. 2019. № 10(49). С. 20–25.
2. Баранова А.А., Савенков А.И. Пенобетон, модифицированный микрокремнеземом ЗАО «Кремний» // *Вестник Иркутского гос. техн. ун-та*. 2014. № 8(91). С. 78–82.
3. Веселова С.И., Черевко С.А., Суворов И.О. Пенобетон на базе отходов камнедробления // *Вестник гражданских инженеров*. 2010. № 4(25). С. 116–119.
4. Кардашевский А.Г., Рожин В.Н., Местников А.Е., Семёнов С.С. Монолитный пенобетон в индивидуальном строительстве // *Промышленное и гражданское строительство*. 2012. № 1. С. 41–43.
5. Краснов М.В. Эффективный неавтоклавный пенобетон с использованием отсевов дробления бетонного лома // *Вестник МГСУ*. 2009. № 3. С. 187–189.
6. Кривых М.В., Баранова К.Т., Лоншаков И.В. Влияние размеров образцов и их влажности на прочность при сжатии пенобетона на основе микрокремнезёма // *Современные технологии и научно-технический прогресс*. 2019. Т. 1. С. 182–183.
7. Ремнев В.В. Практика эффективного применения неавтоклавного пенобетона // *Вестник НИЦ Строительство*. 2020. № 1(24). С. 91–97.
8. Рожин В.Н., Егорова А.Д., Местников А.Е. Неавтоклавный пенобетон для энергоэффективных стеновых изделий и конструкций // *Промышленное и гражданское строительство*. 2013. № 8. С. 27–29.
9. Рябков И.В., Баранова А.А. Влияние средней плотности и влажности пенобетона на основе микрокремнезёма на коэффициент теплопроводности // *Современные технологии и научно-технический прогресс*. 2019. Т. 1. С. 204–205.
10. Сапронова И.А., Боброва А.А., Сокольский А.И. Пенобетон на основе техногенных отходов текстильного производства // *Строительные материалы*. 2007. № 4. С. 49–50.
11. Славчева Г.С., Чернышов Е.М. Алгоритм конструирования структуры цементных пенобетонов по комплексу задаваемых свойств // *Строительные материалы*. 2016. № 9. С. 58–64.
12. Славчева Г.С., Чернышов Е.М., Новиков М.В. Теплоэффективные пенобетоны нового поколения для малоэтажного строительства // *Строительные материалы*. 2017. № 7. С. 20–24.
13. Славчева Г.С. Структурные факторы обеспечения морозостойкости цементных пенобетонов // *Строительные материалы*. 2015. № 9. С. 53–56.
14. Урханова Л.А., Щербин С.А., Савенков А.И., Горбач П.С. Использование вторичного сырья для производства пенобетона // *Строительные материалы*. 2008. № 1. С. 34–37.
15. Шевченко В.А., Артемьева Н.А. Технология пенобетона неавтоклавного твердения с жидкими отходами металлургической промышленности // *Труды Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин)*. 2003. Т. 6, № 2. С. 133–138.

16. Rybakov V., Smirnov A., Volkova A., Seliverstov A., Petrov D. Strength characteristics of foam concrete samples with various additives. International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE) electronic edition, 2018(4):03–15.
17. Sandan A.S., Kysydak A.S. Using fine aggregate to improve concrete properties. Components of Scientific and Technological Progress. 2018;4(38):20–22.
18. Steshenko A.B., Kudryakov A.I. Cement based foam concrete with aluminosilicate microspheres for monolithic construction. Magazine of Civil Engineering. 2018(8):86–96.

FEFU: SCHOOL of ENGINEERING BULLETIN. 2020. N 2/43

Building Materials and Products

www.dvfu.ru/en/vestnikis

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-2-13>

Slavcheva G., Buimarova T.

GALINA SLAVCHEVA, Doctor of Engineering Sciences, Professor,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8800-2657>, ResearcherID: U-4421-2018,
ScopusID: 57195684636, e-mail: gslavcheva@yandex.ru
TATYANA BUIMAROVA, Postgraduate, e-mail: buimarova@mail.ru
Department of Technology of Building Materials, Products and Constructions
Voronezh State Technical University
Voronezh, Russia

Physical-climatic resistance of foam concrete based on waste aggregates

Abstract: Results of the experimental assessment of physical and climatic resistance of cement foam concretes are presented. Basic parameters of moisture and a complex of physical and technical properties of foam concrete as a function of its moist state were evaluated. The standard methods were used for testing the concrete properties. It has been found that the non-autoclaved cement foam concrete based on non-organic waste fine aggregates meet the standard requirements to water resistance, shrinkage, frost resistance, and thermal conductivity at levels meeting the standard requirement to foam concretes of the respective density. Therefore, it can be predicted that their climatic resistance meets the mandatory requirements for materials to be used for enclosing structures. It has been established that in order to increase the climatic resistance of the cement foam concretes, their composition and structural parameters should ensure least susceptibility to moisture influences. Such prioritized parameters should include dispersion and wettability of the fine aggregates surface, and the porosity structure of the foam concrete, which is determined by the characteristics of the fine aggregate and the B/T-ratio in the foam concrete mixture.

Keywords: foam concrete, waste fine aggregate, humidity, strength, water resistance, shrinkage, frost resistance, thermal conductivity.

REFERENCES

1. Asanaliyeva Zh. Non-autoclave foam concrete based on fillers from recycled materials and industrial waste. Academy. 2019(49):20–25.
2. Baranova A., Savenkov A. Foam concrete modified with silica fume of ZAO *Silicon*. Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2014(91):78–82.
3. Veselova S., Cherevko S., Suvorov I. Foam concrete based on stone waste. Bulletin of Civil Engineers. 2010(25):116–119.
4. Kardashevsky A., Rozhin V., Mestnikov A., Semenov S. Monolithic foam concrete in individual construction. Industrial and Civil Construction. 2012(1):41–43.

5. Krasnov M. An effective non-autoclave foam concrete using screenings for crushing concrete scrap. *Vestnik MGSU*. 2009(3):187–189.
6. Krivykh M., Baranova K., Lonshakov I. The effect of sample sizes and their humidity on compressive strength of foam concrete based on silica fume. *Modern Technologies and Scientific and Technological Progress*. 2019;1:182–183.
7. Remnev V. The practice of the effective use of non-autoclave foam concrete. *Bulletin Res. Center Construction*. 2020(24):91–97.
8. Rozhin V., Egorova A., Mestnikov A. Non-autoclaved foam concrete for energy-efficient wall products and structures. *Industrial and Civil Engineering*. 2013(8):27–29.
9. Ryabkov I., Baranova A. The effect of average density and humidity of foam concrete based on silica fume on the coefficient of thermal conductivity. *Modern Technologies and Scientific and Technological Progress*. 2019;1:204–205.
10. Sapronova I., Bobrova A., Sokolsky A. Foam concrete based on industrial wastes of textile production. *Building Materials*. 2007(4):49–50.
11. Slavcheva G., Chernyshov E. Algorithm for designing the structure of cement foam concrete according to a set of specified properties. *Construction Materials*. 2016(9): 58–64.
12. Slavcheva G., Chernyshov E., Novikov M. New generation heat-efficient foam concrete for low-rise construction. *Construction Materials*. 2017(7):20–24.
13. Slavcheva G. Structural factors for ensuring frost resistance of cement foam concrete. *Construction Materials*. 2015(9):53–56.
14. Urkhanova L., Scherbin S., Savenkov A., Gorbach P. The use of recycled materials for the production of foam concrete. *Construction Materials*. 2008(1):34–37.
15. Shevchenko V., Artemyeva N. The technology of non-autoclaved foam concrete with liquid waste from the metallurgical industry. *Transactions of Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)*. 2003;6(2):133–138.
16. Rybakov V., Smirnov A., Volkova A., Seliverstov A., Petrov D. Strength characteristics of foam concrete samples with various additives. *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE) electronic edition*, 2018(4):03–15.
17. Sandan A.S., Kysydak A.S. Using fine aggregate to improve concrete properties. *Components of Scientific and Technological Progress*. 2018;4(38):20–22.
18. Steshenko A.B., Kudryakov A.I. Cement based foam concrete with aluminosilicate microspheres for monolithic construction. *Magazine of Civil Engineering*. 2018(8):86–96.