

УДК 666.973.6:543.712:006 354

666.973.6:539.217:006 354

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4\(27\)-117-125](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4(27)-117-125)

СОРБЦИОННАЯ ВЛАЖНОСТЬ И ПАРОПРОНИЦАЕМОСТЬ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

(по результатам пересмотра ГОСТ 12852.6-77 «Бетон ячеистый. Метод определения сорбционной влажности» и ГОСТ 12852.5-77 «Бетон ячеистый. Методы определения коэффициента паропроницаемости»)

SORPTION HUMIDITY AND VAPOR PERMEABILITY OF CELLULAR CONCRETE

(according to the results of the revision of GOST 12852.6-77 «cellular Concrete. Method for determining sorption humidity», and GOST 12852.5-77 «cellular Concrete. Methods for determining the vapor permeability coefficient»)

В. Н. СТРОЦКИЙ, канд. техн. наук

С. Г. ЗИМИН

С. С. ЖОРОБАЕВ, канд. техн. наук

А. М. КРОХИН, канд. техн. наук

Рассмотрены актуальные вопросы исследований и данных нормативных документов, посвященных таким актуальным свойствам и качествам ячеистых бетонов как сорбционная влажность и паропроницаемость. Выполнен анализ отечественных и зарубежных нормативных документов по регламентируемым показателям сорбционной влажности и паропроницаемости ячеистого бетона.

Приведены опытные данные, полученные в результате испытаний ячеистого бетона по определению сорбционной влажности и влияния на нее газовой и капиллярной пористости, а также водотвердого отношения и плотности ячеистого бетона.

Выполнен анализ расчетных формул, по которым определяется коэффициент паропроницаемости в различных нормативных документах.

Current issues of research and data of normative documents on such actual properties and qualities of cellular concrete as sorption humidity and vapour permeability are considered. The analysis of domestic and foreign normative documents on regulated indicators of sorption humidity and vapour permeability of cellular concrete is performed.

Experimental data obtained from tests of cellular concrete to determine sorption humidity and the effect of gas and capillary porosity on it, as well as the water-solid ratio and density of cellular concrete, are presented.

The analysis of calculation formulas for determining the vapor permeability coefficient in various regulatory documents is performed.

Ключевые слова:

Диффузия водяного пара, паропроницаемость, поробетон, сорбционная влажность, ячеистый бетон

Key words:

Cellular concrete, foam concrete, sorption humidity, vapour permeability, water vapor diffusion

Одним из главных направлений ресурсоэнергосбережения в строительстве и эксплуатации жилых зданий в рамках реализации приоритетного национального проекта «Доступное и комфортное жилье – гражданам России» является максимально возможное повышение уровня тепловой защиты зданий при минимально возможных материальных затратах путем эффективного применения инновационных решений с использованием высокоеффективных в теплозащитном отношении, долговечных и при этом – низкоэнергоемких и экономичных строительных материалов.

Вопросы энергосбережения для климатических условий нашей страны являются весьма актуальными. В последнее время находят всё большее распространение и применение различные виды ячеистого бетона, поскольку они служат высокоэффективными стеновыми материалами. Конструкции, изготовленные из такого бетона, выполняют как теплоизоляционные, так и несущие функции. Такие конструкции являются более энергоэффективными ограждающими конструкциями по сравнению с другими существующими техническими решениями наружных стен, используемыми в нашей стране.

Ячеистый бетон обладает уникальным сочетанием физико-технических свойств (низкая теплопроводность, высокая паропроницаемость, негорючность), что позволяет широко использовать его для утепления ограждающих конструкций и исключить основные недостатки, присущие многослойным системам утепления на основе минераловатных и пенополистирольных изделий. Теплоизоляционные материалы из ячеистого бетона за последние годы весьма востребованы, имеют более высокую долговечность по сравнению с органоминеральными. Материал не слеживается, не содержит органику, влага быстро высыхает, и не происходит ее накопление из-за большого количества открытых пор.

Длительное пребывание строительного материала, в частности, ячеистого бетона, в воздушной среде с постоянной относительной влажностью и температурой приводит к тому, что в нем устанавливается определенное содержание влаги, которое называют равновесной влажностью строительного материала.

При длительных колебаниях влажности из-за смены летних и зимних климатических условий влияние сорбции отражается на влажностном состоянии ячеистого бетона и в результате диффузии приводит к увеличению этого влияния. Одновременно равновесное содержание влаги в ячеистом бетоне не устанавливается непосредственно сразу после строительства. Вначале имеет место повышенная влажность изделий, так как ячеистый бетон в условиях изготовления характеризуется отпускной влажностью. Затем повышенная начальная влажность наружных стен из ячеистого бетона значительно снижается уже до начала первого отопительного периода с 16 до 5% [15].

По данным [18] влажность в наружных слоях ячеистого бетона непосредственно после заводского изготовления составляет 19-20%, а в средней части изделий – 26-27%. Через месяц после окончания монтажа изделий влажность в наружных стенах снижается соответ-

ственno только на 12-14% и 24-25%. После 10 месяцев эксплуатации влажность в наружных слоях стен составляет 6-8%, а в средней части этих стен – от 13 до 14%. Через 1,5 года эксплуатации влажность в стенах снижается до 4-5% и 8-9% соответственно. После двух лет эксплуатационная влажность уже не превышает 4-5%.

С увеличением относительной влажности воздуха при постоянной температуре возрастает сорбционная влажность материала. Установившийся уровень содержания влаги в ячеистом бетоне представляют изотермой сорбции, построенной на основании замеров в слабо и нормально отапливаемых помещениях (рис. 1).

Установлено по данным, опубликованным в [6], что в среде с относительной влажностью воздуха в помещении от 50 до 70% массовое влагосодержание в поробетоне находится в пределах 3-4%. В соответствии с этим DIN EN ISO 12524 [9] определяет нормативы содержания равновесной влаги в размере 2,6% (при 23 °C и W = 50%) и 4,5% (при 23 °C и W = 80%).

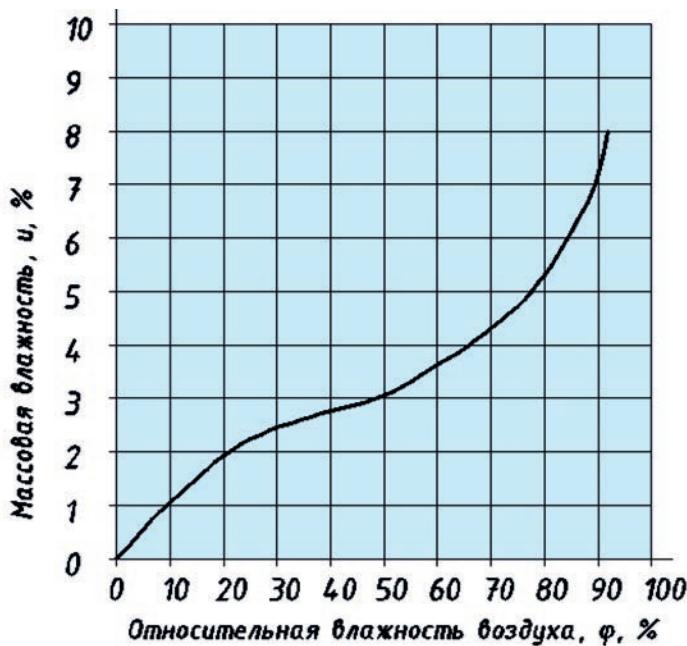


Рис. 1. График зависимости массового влагосодержания в поробетоне от относительной влажности воздуха в помещении [по данным [15]]

Ячеистый бетон вследствие высокой пористости и структурной неоднородности обладает значительной свободной поверхностной энергией, что обуславливает уменьшение поверхностного натяжения на границе двух фаз твердое тело – воздух за счет адсорбции, капиллярной конденсации и капиллярного насыщения водяными парами. Интенсивность и степень указанных процессов в значительной мере определяются структурой порового пространства. Как известно, величина адсорбции пара на поверхности твердой фазы определяется уравнением Гиббса.

Изменения структуры твердой фазы и порового пространства ячеистого бетона оказывают влияние на свойства, отражающие степень его взаимодействия с водяными парами и водой,

такими как сорбционная влажность, капиллярный подсос, водопоглощение. Проведенные в НИИЖБ эксперименты [16] показали, что с изменением водотвердого отношения (В/Т) от 0,2 до 1,0 величина сорбционной влажности уменьшается с 14 до 11-12%. При этом наибольшей сорбционной влажностью обладает ячеистый бетон, изготовленный с пониженным В/Т-фактором. Так, величина сорбционной влажности образцов микросиликата с В/Т = 0,6-1,0 в 1,2-1,3 раза меньше, чем при В/Т = 0,2.

Влияние газовой и капиллярной пористости на сорбционную влажность изучалось также на образцах газосиликата с изменяющейся плотностью в диапазоне 545 – 1015 кг/м³ и постоянном В/Т = 0,45 при капиллярной пористости 47% и на образцах с постоянной плотностью 600 кг/м³, но с изменяющейся капиллярной пористостью от 43 до 55% за счет повышения В/Т с 0,38 до 0,65. Эти исследования свидетельствуют о том, что при снижении плотности ячеистого бетона с 1015 до 545 кг/м³ величина сорбционной влажности уменьшается с 19 до 13,8%. Повышение же капиллярной пористости газосиликата постоянной плотностью 600 кг/м³ с 43 до 55% приводит к экстремальному изменению показателей сорбционной влажности. Так, сорбционная влажность у образцов с В/Т = 0,38 оказалась в 1,4 и 2,2 раза выше, чем у образцов с В/Т = 0,45 и 0,55 соответственно.

Указанные изменения свойств газосиликата связаны прежде всего с модификацией структуры порового пространства и цементирующих веществ ячеистого бетона.

Методика упомянутых исследований состояла в том, что величину сорбционного насыщения ячеистого бетона определяли на образцах размером 4×4×16 см, помещенных в среду с парциальным давлением водяных паров 95-97% (по отношению к давлению насыщенного водяного пара). Образцы периодически взвешивали на весах с точностью до 0,5 г в течение 38 сут. За этот период времени происходила стабилизация массы образцов.

Как известно, наряду с влагой, содержащейся в самих строительных конструкциях, они подвергаются воздействию влаги в процессе эксплуатации. Определенное количество водяных паров выводится наружу из помещения через строительные конструкции посредством диффузии. Вследствие градиента давления водяного пара в направлении изнутри наружу происходит диффузия этого водяного пара в направлении наружной стороны. При этом может происходить и обратная диффузия, когда влага, которая находится в области с повышенным давлением насыщенного водяного пара, может вернуться в воздух помещения с более низким давлением пара. Физический процесс диффузии водяного пара зависит от проницаемости ячеистого бетона. Диффузионные характеристики строительных конструкций рассчитывают методом Глазера, приведенным в немецких нормах DIN 4108-3 [13].

В DIN 4108-4 [12] и DIN 1745 [11], а также в европейском стандарте EN 771-4-2003 [12] диффузионные характеристики ячеистого бетона регламентируются коэффициентом диффузии водяного пара, который представляет собой отношение сопротивления слоя ячеистого бетона к сопротивлению воздушного слоя той же толщины при одинаковых условиях. Для ячеистого бетона плотностью 300-1000 кг/м³ коэффициент диффузии водяного пара равен 5/10. По данным [15] коэффициент сопротивления диффузии водяного пара в зависимости от средней плотности ячеистого бетона (поробетона) может составлять от 5 до 10.

Меньшее значение указанного коэффициента относится к диффузии водяного пара в строительный элемент, а большее – из строительного элемента.

Вопрос паропроницаемости ячеистого бетона связан также с возможностью в определенных случаях образования конденсата диффундирующей влаги и обратного капиллярного

переноса, когда появившийся конденсат из наружных слоев ячеистого бетона (при влажности воздуха у наружных слоев 80% и пониженной температуре) проникает в более сухие и теплые внутренние слои. При этом возникает опасность появления плесени.

В нормативных документах (ГОСТ 25898-2012 [3], ES ISO 12572:2001 [6]) диффузионные характеристики различных строительных материалов оцениваются коэффициентом паропроницаемости, или просто паропроницаемостью, который используется при анализе теплотехнических свойств этих материалов и является одним из важнейших показателей свойств ячеистого бетона, определяющим его долговечность и комфортность среды обитания.

По белорусским ТКП 45-2.04-43-2006 [7] величины расчетных коэффициентов паропроницаемости для ячеистого бетона плотностью от 300 до 1000 кг/м³ принимаются в основном такими же, как и по ГОСТ 25485-89 и СП.50.13330.2012. При этом следует отметить, что значение коэффициента паропроницаемости зависит от метода испытания. Так, например, по данным С. Л. Галкина [17] значения коэффициента паропроницаемости ячеистого бетона плотностью 400-700 кг/м³, определенные по ГОСТ 25898, значительно (в 2,6 раза) превосходят соответствующие значения этого коэффициента, определенные по ES ISO 12572:2001. Далее приведена сравнительная таблица со значениями коэффициента паропроницаемости μ , определенного по ГОСТ 25898 и ES ISO 12572:2001.

Таблица 1

**Значения коэффициента паропроницаемости ячеистого бетона
плотностью 400-700 кг/м³, определенного по ГОСТ 25898 и ES ISO 12572:2001**

Плотность γ , кг/м ³	Коэффициент паропроницаемости μ , мг/м·ч·Па	
	Метод испытания	
	ГОСТ 25898	ES ISO 12572:2001
400	0,23	0,096
500	0,20	0,087
600	0,17	0,076
700	0,18	0,070

По ГОСТ 12852.5-2020 [1] коэффициент паропроницаемости μ , мг/(м·ч·Па), вычисляют по формуле

$$\mu = \frac{Q \cdot \delta}{A(P_1 - P_2) - Q \frac{\delta_B}{\mu_B}}, \quad (1)$$

где Q – интенсивность установившегося стационарного потока водяного пара, мг/ч;

δ – средняя толщина испытуемого образца, м;

A – площадь рабочей поверхности образца, через которую проходит поток водяного пара, м²;

P_1 – парциальное давление насыщенного водяного пара в испытательном сосуде под образцом, Па;

P_2 – среднее парциальное давление водяного пара над образцом вокруг сосуда в климатической камере, Па;

δ_B – толщина воздушного слоя (расстояние от уровня раствора в стеклянной чашке до нижнего основания образца), м;

μ_e – коэффициент паропроницаемости воздуха, определяемый по графику на рисунке А.1 ГОСТ 25898–2012.

Парциальное давление насыщенного водяного пара P_1 в зарубежных и отечественных нормативных документах определяют по-разному по формулам, имеющим различное выражение, но одинаково отражающим физический смысл процесса диффузии водяного пара.

Например, в старой (отмененной) редакции ГОСТ 12852.5-77 при обработке результатов испытания на паропроницаемость парциальное давление насыщенного пара под образцом предлагалось определять по психрометрическим таблицам на основании значений относительной влажности и температуры воздуха.

По ГОСТ 25898-2012 значения парциального давления насыщенного водяного пара при температуре воздуха над водой от 17,0 °C до 28,9 °C определяют по таблице Д.1 в Приложении Д.

Согласно ГОСТ 32303-2011 (EN 13469:2001) [4] и ГОСТ 12852.5-2020 давление насыщенного водяного пара в испытательном сосуде под образцом при относительной влажности $\varphi_e = 100\%$ и фактической температуре воздуха T , Кельвины определяют по формуле

$$p_s = a \cdot \left(b + \frac{T - 273,15}{100} \right)^n,$$

где $a = 288,68$ Па;

$b = 1,098$;

$n = 8,02$;

T – температура, К.

С учетом подстановки численных значений a , b , n имеем

$$P_1 = 288,68 \cdot \left(1,098 + \frac{T - 273,15}{100} \right)^{8,02}. \quad (2)$$

По СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [14] парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре t , °C, от минус 40 до плюс 45 °C определяется по формуле (8.8) из СП 50.13330.2012:

$$E = 1,84 \cdot 10^{11} \exp \left(-\frac{5330}{273 + t} \right),$$

или

$$P_1 = 1,84 \cdot 10^{11} \exp \left(-\frac{5330}{273 + t} \right). \quad (3)$$

В то же время в соответствии с БС 5250:1989 [8] и СТБ EN ISO 12572-2008 [6] парциальное давление водяного пара P_1 в климатической камере в процессе испытания образцов (вокруг испытательного сосуда над образцом P_2 и в испытательном сосуде под образцом P_1 , т.е. над каждой стороной образца) рассчитывается по фактической температуре и относительной влажности воздуха по формуле

$$P_{1(2)} = \varphi_e \cdot 610,5 e^{\frac{17,269 \cdot t}{237,3 + t}}, \quad (4)$$

где e – число Эйлера (основание натурального логарифма, равное 2,71828);

t – температура, °C;

φ_e – относительная влажность воздуха, выраженная в ед., $\varphi_e \% / 100$.

Анализ приведенных формул показывает, что вычисление значений парциального давления насыщенного водяного пара по формулам (2) и (4), а также определение его по таблице Д.1 ГОСТ 25898–2012 при температуре $T = 20^{\circ}\text{C}$ дают практически одинаковые результаты (табл. 2).

Таблица 2
Парциальное давление насыщенного пара при температуре $T = 20^{\circ}\text{C}$

Расчет выполнен			
По формуле (2)	По формуле (3)	По формуле (4)	по таблице Д.1 ГОСТ 25898–2012
2338,2	2314	2336,4	2338

В то же время формула (3) или (8.8) по СП 50.13330.2012 несколько занижает значение парциального давления; в частности, для температуры 20°C значения P_1 , определенные по формуле (3), на 1% меньше, чем значения P_1 , вычисленные по формулам (2), (4) и определенные по таблице Д.1 ГОСТ 25898–2012.

Соответственно, и значения парциального давления P_2 , вычисленные по формулам (4) и (5) ГОСТ 12852.5-2020, будут также отличаться, если значение P_1 в формуле (5) вычислять по формуле (3) или (8.8) из СП 50.13330.2012, что, в конечном счете, может повлиять на результат определения коэффициента паропроницаемости (несколько повысить μ), вычисляемого по формуле (2) ГОСТ 12852.5-2020.

Выводы и рекомендации

Коэффициент паропроницаемости и сорбционная влажность используются при анализе теплотехнических свойств ограждающих конструкций и являются важнейшими физическими показателями ячеистого бетона, определяющими его долговечность и комфортность среды обитания.

Актуализация регламентируемых стандартами ГОСТ 12852.5-2020 и ГОСТ 12852.6-2020 требований к методам испытаний (а значит, и более точный расчет теплотехнических показателей ограждающих конструкций с уточненными значениями сорбционной влажности и паропроницаемости) будет способствовать оптимальному проектированию энергоэффективных жилых зданий и расширению выпуска ячеистого бетона на предприятиях РФ в рамках реализации приоритетного национального проекта «Доступное и комфортное жилье – гражданам России».

Библиографический список

1. ГОСТ 12852.5-2020 «Бетон ячеистый. Методы определения коэффициента паропроницаемости».
2. ГОСТ 25485-89 «Бетоны ячеистые. Технические условия».
3. ГОСТ 25898-2012 «Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию».
4. ГОСТ 32303-2011 (EN 13469:2001) «Изделия теплоизоляционные, применяемые для инженерного оборудования зданий и промышленных установок. Метод определения характеристик паропроницаемости цилиндров заводского изготовления».

5. ГОСТ EN 12086-2011 «Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения характеристик паропроницаемости».
6. СТБ EN ISO 12572-2008 «Теплотехнические свойства строительных материалов и изделий. Определение паропроницаемости».
7. ТКП 45-2.04-43-2006 «Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования».
8. БС 5250:1989 «Британский стандартный кодекс установившейся практики по контролю конденсации в строительстве».
9. DIN EN ISO 12524:2000; Deutsche Fassung EN 12524:2000 Baustoffe und -produkte – Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte.
10. DIN 4108-4 «Теплотехника в строительстве высотных зданий. Тепло-влагозащитные характеристики».
11. DIN 1745 «Метод определения расчетных значений тепловой защиты. Каменная кладка и ее продукты».
12. EN 771-4-2003 «Требования к строительным блокам из автоклавного ячеистого бетона».
13. DIN 4108-3 Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung (Ausgabe 2018-10).
14. СП.50.13330.2012 «Тепловая защита зданий».
15. Гоманн М. Поробетон: руководство / пер. с нем. Под ред. А.С. Коломацкого. Белгород: П59 Изд-во ЛитКараВан, 2010. – 272 с.
16. Крохин А.М. Автоклавный ячеистый бетон с повышенной прочностью при растяжении / Дисс. ... канд. техн. наук. М., 1979.
17. Галкин С.Л., Сажнев Н.П., Соколовский Л.В., Сажнев Н.Н. Применение ячеистобетонных изделий. Теория и практика. Минск: «Стринко», 2006. 448с.
18. Батяновский Э.И., Голубев Н.М., Сажнев Н.Н. Производство ячеистобетонных изделий автоклавного твердения: пособие. Минск: «Стринко», 2009. 128 с.

Авторы:

Валерий Николаевич СТРОЦКИЙ, канд. техн. наук, заведующий сектором лаборатории технологии бетонов НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Valeriy STROTSKIY, Ph. D. (Engineering), Head of the Sector of the Laboratory of Concrete Technology of NIZHBT named after A. A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: np.ots@mail.ru

Сергей Григорьевич ЗИМИН, инженер лаборатории технологии бетонов НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Sergey ZIMIN, engineer of the Laboratory of Concrete Technology NIZHBT named after A. A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: niigb@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-75-92

Суютбек Сатыбалдыевич ЖОРОБАЕВ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории технологии бетонов НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Suiutbek ZHOROBAEV, Ph. D. (Engineering), senior researcher of the Laboratory of Concrete Technology of NIIZHB named after A. A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: gss1160@mail.ru
тел.: +7 (499) 174-76-61

Алексей Митрофанович КРОХИН, канд. техн. наук, заместитель генерального директора ООО «Холдингвibrопресс», Москва

Aleksey KROKHIN, Ph. D. (Engineering), deputy general director of LLC «Holdingvibropress», Moscow

e-mail: veter1790@mail.ru
тел.: +7 (916) 507-57-98