

УДК 666.973.6:543.712:006 354
666.973.6:539.217:006 354

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3\(30\)-88-99](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-88-99)

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ВОЗВЕДЕНИИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

ACCOUNTING FOR THE INFLUENCE OF HUMIDITY PROPERTIES OF AUTO- CLAVE-CURED CELLULAR CONCRETE IN THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF ENCLOSING STRUCTURES

В.Н. СТРОЦКИЙ, канд. техн. наук
А.М. КРОХИН, канд. техн. наук
В.И. САВИН, канд. техн. наук

Рассмотрены результаты исследований пористости, водопоглощения, влажностной усадки и морозостойкости ячеистых бетонов, которые являются одними из основных факторов, определяющих долговечность ячеистобетонных ограждающих конструкций, изготавливаемых по технологии автоклавного твердения.

Приведены методики определения водопоглощения, влажностной усадки, а также морозостойкости. Установлена связь между влажностной усадкой и капиллярными силами (суммой сил поверхностного натяжения на микроменисках жидкости в капиллярах ячеистого бетона), а также зависимость усадки от размеров (радиуса) капиллярных и газовых

The results of studies of porosity, water absorption, moisture shrinkage and frost resistance of cellular concrete, which are some of the main factors determining the durability of cellular concrete enclosing structures manufactured using autoclave hardening technology, are considered.

Methods for determining water absorption, moisture shrinkage and frost resistance are presented. The relationship between the moisture shrinkage and the capillary forces (the sum of the surface tension forces on the micromenisci of liquid in the capillaries of cellular concrete), as well as the dependence of the shrinkage on the size (radius) of the capillary and gas pores of cellular concrete

пор ячеистого бетона и от водотвердого отношения (В/Т-фактора) ячеистого бетона.

В области морозостойкости ячеистого бетона изучена взаимосвязь структуры порового пространства бетона с его деформативными характеристиками при действии отрицательных температур. Описан эффект наличия газовых пор ячеистого бетона на снижение деформаций морозного расширения.

Ключевые слова:

Влажностная усадка, водопоглощение, газовая пористость, диффузия водяного пара, капиллярная пористость, капиллярный подсос, морозостойкость, паропроницаемость

and on the water-solid ratio (W/S-factor) of cellular concrete, is established.

In the field of frost resistance of cellular concrete, the relationship between the structure of the pore space of concrete and its deformation characteristics under the action of negative temperatures is studied.

The effect of the presence of gas pores in cellular concrete on the reduction of frost expansion deformations is described.

Keywords:

Capillary porosity, capillary suction, frost resistance, gas porosity, moisture shrinkage, vapor permeability, water absorption, water vapor diffusion

За последние годы теплоизоляционные материалы из ячеистого бетона весьма востребованы, так как имеют более высокую долговечность по сравнению с органоминеральными материалами. Ячеистый бетон не слеживается, не содержит органику, влага быстро высыхает и не происходит ее накопление из-за большого количества открытых пор.

В то же время следует отметить, что длительное воздействие влаги и отрицательной температуры оказывает негативное влияние на долговечность ограждающих конструкций. Поэтому недостаточный учет этих факторов при проектировании, изготовлении, возведении и эксплуатации ограждающих конструкций из ячеистого бетона может приводить к негативным последствиям.

Например, в г. Норильске сложилась негативная ситуация по обеспечению эксплуатационной надежности и долговечности фасадов жилых 5- и 9-этажных домов серий 1-464, 1-464-М, 1-477-с, 1-464Д-82 (гостиничного типа), построенных в 70-е годы. Фасады таких домов выполнены из однослойных газозолобетонных стеновых панелей толщиной 350-400 мм класса по прочности газозолобетона не выше В3,5, применяемых для строительства 5-этажных крупнопанельных домов.

В результате выполненного обследования указанных стеновых панелей с различными видами отделочного покрытия были обнаружены существенные дефекты, требующие проведения комплекса серьезных восстановительных мероприятий.

Из анализа дефектов, образовавшихся за 50-летний срок эксплуатации, следует, что наиболее распространенными являются отслаивание защитно-декоративного покрытия вместе со слоем газозолобетона, с оголением арматуры, а также трещины с шириной раскрытия до 2,0 мм. Основные дефекты показаны на рис. 1, 2 и 3.



Рис. 1. Фрагменты стеновых ограждающих конструкций здания в г. Норильске, район Талнах, ул. Бауманская, д.33, с различными дефектами в виде отслоений защитного слоя бетона, трещин различной ширины, раскрытия и коррозии арматуры



Рис. 2. Фрагменты стеновых ограждающих конструкций здания в г. Норильске, район Талнах, ул. Горняков, д.14, с различными дефектами в виде отслоений защитного слоя бетона, трещин различной ширины, раскрытия и коррозии арматуры

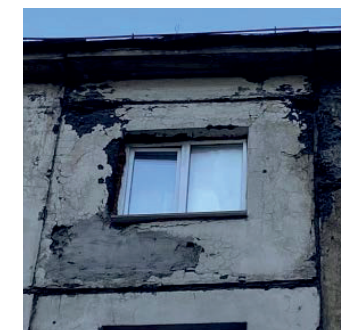
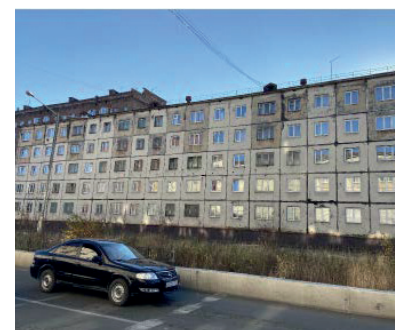


Рис. 3. Фасад и фрагменты стеновых ограждающих конструкций жилого 5-этажного дома в г. Норильске, ул. Павлова, д. 18, с отслоениями защитного слоя бетона и следами неудачного восстановления поврежденного участка нанесением ремонтной смеси

Указанные виды повреждений вызваны, в том числе, использованием в качестве защитно-отделочных покрытий с низкой паропроницаемостью, что в конечном счете привело к накоплению влаги и к повышенному влагосодержанию газозолобетона в панелях под защитно-отделочным покрытием за весь период длительной эксплуатации при экстремально низких температурах и, как следствие, к разрушению не только самого покрытия, но и газозолобетона под ним. Это, в свою очередь, обусловило также значительное снижение теплозащитных качеств ограждающих конструкций указанных зданий.

Ранее в публикации [21] авторами были рассмотрены вопросы влияния паропроницаемости, сорбционной влажности, пористости, капиллярного подсоса и водопоглощения на долговечность ячеистого бетона.

Рассмотрим длительное воздействие влаги (с позиций влажностной усадки) и отрицательной температуры (с позиций морозостойкости) на качественные показатели ячеистого бетона.

Пористость, капиллярный подсос, водопоглощение ячеистого бетона

Эксперименты по влиянию структуры порового пространства ячеистого бетона на степень его взаимодействия с водяными парами и водой проводились в НИИЖБ [18].

Объем общей, капиллярной и газовой пористости ячеистого бетона рассчитывали по следующим формулам:

а) общий объем пор, м³/м³

$$V_{\text{общ}} = 1 - \frac{\gamma_{\text{о.я}}}{\gamma_{\text{уд}}};$$

б) объем газовых пор, м³/м³

$$V_{\text{газ}} = 1 - \frac{\gamma_{\text{о.я}}}{\gamma_{\text{о.м}}};$$

в) объем капиллярных пор, м³/м³

$$V_{\text{кап}} = V_{\text{общ}} - V_{\text{газ}},$$

где $\gamma_{\text{о.я}}$ – плотность ячеистого бетона, кг/м³;

$\gamma_{\text{уд}}$ – удельный вес, определенный на приборе Ле-Шателье и равный 2,42 г/см³ или 2420 кг/м³;

$\gamma_{\text{о.м}}$ – плотность микропористого материала (микросиликата, изготовленного на тех же сырьевых материалах, что и ячеистый бетон, без введения газообразователя).

Водопоглощение по массе и объему определяли после выдерживания образцов в воде в течение 3 суток. В течение первых суток образцы погружали в воду на 1/3 высоты, на вторые сутки – на 2/3 высоты и на третьи сутки погружали в воду полностью.

Водопоглощение по объему рассчитывали по формуле

$$W_0 = \frac{m_1 - m_2}{V} \cdot 100\%.$$

Водопоглощение по массе

$$W_m = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100\%,$$

где m_1 – масса влажного образца, г;

m_2 – масса сухого образца, г;

V – объем образца, см³.

Распределение капиллярных пор по размерам устанавливали методом ртутной порометрии на поромерах низкого и высокого давления.

Величину капиллярного подсоса определяли по количеству влаги в граммах, подсываемой в течение 72 ч единицей поверхности (см²) поперечного сечения призмы размером 4×4×16 см, один из торцов которой был погружен в воду на глубину 2 см.

Степень заполнения пор водой определяли по соотношению водопоглощения по объему к общей пористости.

Объемное соотношение жидкой и твердой фаз определяли как отношение водопоглощения по объему к объему твердой фазы.

Показатели капиллярного насыщения – с 4,1 до 2,8 г/см², водопоглощение по объему и степень заполнения пор водой снижаются в 1,3-1,7 раза. Однако при этом повышаются в 1,4-1,6 раза водопоглощение по массе и объемное соотношение жидкой и твердой фаз.

Кроме этого, было также установлено, что при дисперсном армировании ячеистого бетона волокнистой добавкой асбеста происходило в большинстве случаев некоторое снижение показателей сорбции и капиллярного насыщения.

Влажностная усадка ячеистого бетона

Влажностную усадку ячеистого бетона (газосиликата) и микросиликата определяли на 5 образцах в каждой серии, размерами соответственно 4×4×16 см и 1×4×16 см, помещенных в эксикаторы с различными парциальными давлениями водяных паров, которые создавали за счет кристаллического хлористого кальция, и над насыщенными растворами бромистого кальция, хлористого магния, азотнокислого магния и хлористого натрия. Длительность испытаний составляла 180 сут. Измерение длины производили с точностью до 0,01 мм, а взвешивание – с точностью до 0,01 г.

Для установления полной усадки при высушивании образцы помещали в сушильный шкаф и выдерживали одни сутки при 50 °С и двое суток при 105 °С.

Капиллярное насыщение порового пространства ячеистого бетона приводит, в свою очередь, к проявлению влажностной усадки, которая, по мнению ряда исследователей, вызывается преимущественно капиллярными силами, представляющими собой сумму сил поверхностного натяжения на микроменисках жидкости в капиллярах бетона. Величина напряжений в поверхностном слое бетона и усадка, вызываемая капиллярными силами, связаны, с одной стороны, с размерами капилляров, а с другой – с влажностным градиентом между внутренними слоями и поверхностным слоем. Величину непроявившейся усадки можно приближенно оценить по формуле

$$\varepsilon_{\text{ус}} = \frac{2\sigma}{r} \cdot \omega \cdot \frac{1}{E} \cdot \Delta W,$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения;

ω – отношение площади смоченных пор ко всей площади элемента;

r – радиус капилляров;

E – модуль упругости бетона;

ΔW – перепад влагосодержания (влажностный градиент) между внутренними и поверхностными слоями.

При этом считается, что порами, в наибольшей степени способствующими проявлению влажностной усадки и в которых образуются мениски при относительной влажности более 75%, считаются те, у которых радиус составляет от 50 до 1000 Å (ангстрем), т. е. для снижения влажностной усадки, уменьшения напряжений в поверхностном слое и повышения трещиностойкости бетона структура его порового пространства должна включать минимально возможное количество микропор радиусом 50-1000 Å, а также обладать определенными диффузионными свойствами, обеспечивающими минимальный влажностный градиент между внутренними и поверхностными слоями.

Влияние В/Т-фактора на величину влажностной усадки было изучено на образцах микросиликата (материала, из которого формируются мембраны ячеистого бетона).

Исследованиями установлено, что достижение равновесной влажности происходило за меньший промежуток времени у микросиликата с более высокой пористостью и большим средним радиусом капиллярных пор. При этом конечная влажность образцов оказывалась выше для микросиликата с порами меньшего среднего радиуса.

Наиболее четко полученный вывод находит свое подтверждение данными по удельной влажностной усадке (отношение предельной усадки к величине потери влаги в % по массе). Так, при увеличении среднего радиуса пор от 120 до 650 Å удельная усадка микросиликата снижалась в 4-5,6 раза.

Усадка образцов микросиликата при высушивании образцов при температуре 105 °С составила 1,6-2,4 мм/м.

Поризация микросиликата газовыми порами существенно уменьшает его усадку. Так, полные усадочные деформации при высушивании при температуре 105 °С образцов ячеистого бетона плотностью 600 кг/м³, изготовленных с В/Т = 0,38, 0,45, 0,55 и 0,65, составили соответственно 0,89; 0,99; 0,95 и 0,92 мм/м и не зависели от капиллярной пористости мембран ячеистого бетона.

Также установлено, что усадка дисперсно армированного газосиликата с В/Т-фактором 0,7-0,8 не превышала усадку ячеистого бетона с В/Т = 0,45-0,55, хотя послеавтоклавная влажность в первом случае была значительно выше.

Морозостойкость ячеистого бетона

Другой важнейшей характеристикой ячеистого бетона является его морозостойкость.

Общеизвестно, что основная причина разрушения бетона при действии отрицательных температур связана с давлением, возникающим в бетоне при переходе воды из жидкого в кристаллическое состояние, с увеличением объема примерно на 9%. Морозостойкость бетонов (представляющих собой замкнутую систему) определяется структурой его порового пространства и зависит от:

- величины водопоглощения и степени заполнения пор водой;
- размеров резервных пустот для отжатия воды, находящейся в микрокапиллярах, в процессе движения фронта льда;
- способности бетона осуществлять процесс отжатия воды в резервные пустоты.

Указанные обстоятельства послужили предпосылкой к изучению взаимосвязи структуры порового пространства бетона с его деформативными характеристиками при действии отрицательных температур.

Исследования были проведены в НИИЖБ [18] на микросиликате (из которого формируются мембраны ячеистого бетона) и ячеистом бетоне. Микросиликат был изготовлен с В/Т в интервале от 0,2 до 1,0 и характеризовался отсутствием газовых (резервных) пор, плотностью в диапазоне от 905 до 1500 кг/м³, пористостью от 38 до 62,6%, водопоглощением по массе – от 28 до 62% и объемным соотношением жидкой и твердой фаз – от 0,69 до 1,67 (при максимальном водопоглощении).

Деформации при замораживании сухих и водонасыщенных образцов из микросиликата и ячеистого бетона определяли на образцах размерами 4×4×16 см. Образцы помещали в морозильную камеру с температурой минус 15 °С и выдерживали в течение 8 ч. Длины образцов измеряли через каждый час с точностью до 0,01 мм.

В результате проведенных испытаний в морозильной камере при снижении температуры с +20 до минус 15 °С высушенные образцы микросиликата, а также образцы ячеистого бетона имели деформацию укорочения 0,25-0,33 мм/м.

Водонасыщенные образцы микросиликата с В/Т = 0,2 и соотношением жидкой и твердой фаз 0,69 при выдерживании в морозильной камере в течение 8 ч получили деформацию укорочения 0,38 мм/м. Их деформационные свойства практически не отличались от сухих образцов. Замораживание образцов микросиликата с В/Т = 0,4; 0,6; 0,8 в течение первых двух часов сопровождалось деформациями укорочения до 0,3 мм/м. Очевидно, что за это время происходило лишь частичное замерзание воды. Дальнейшее же выдерживание образцов при температуре минус 15 °С приводило к деформациям расширения. При этом более высокими деформациями расширения обладали образцы микросиликата, у которых было выше соотношение жидкой и твердой фазы. Так, если при В/Т = 0,4 деформации расширения при выдерживании в течение 8 ч составили 0,34 мм/м, то для В/Т = 1,0 они возросли до 1,7 мм/м (рис. 4,а).

Введение же в микросиликат газовых пор способствует снижению деформаций расширения. Образцы ячеистого бетона (из автоклавного газосиликата) плотностью 1015 кг/м³ и общей пористостью 58% (включая газовые поры 20,6%) имели практически одинаковые деформационные свойства (деформации укорочения) как в водонасыщенном, так и в высушенном состоянии. Однако с уменьшением плотности до 545 кг/м³ после 3 ч выдерживания в морозильной камере деформации водонасыщенных образцов получали обратный знак, и образцы стремились восстановить первоначальные размеры (рис. 4, б), что, очевидно, было связано с повышенным водопоглощением по массе образцов – 78% против 47% (при плотности 1015 кг/м³) и с увеличением при этом соотношения жидкой и твердой фаз в бетоне с 1,12 до 1,6 соответственно.

Образцы из газосиликата с постоянной плотностью 600 кг/м³, изготовленные с различным соотношением газовых и капиллярных пор (вследствие пропорционального снижения расхода газообразователя и повышения В/Т-фактора с 0,38 до 0,65) имели практически одинаковые деформационные свойства (рис. 4, в). При замораживании до минус 15 °С в первые 3 ч имели место деформации укорочения всех образцов в диапазоне 0,2-0,25 мм/м, а дальнейшее выдерживание образцов до 8 ч сопровождалось деформациями расширения на величину 0,1-0,15 мм/м без превышения деформаций укорочения.

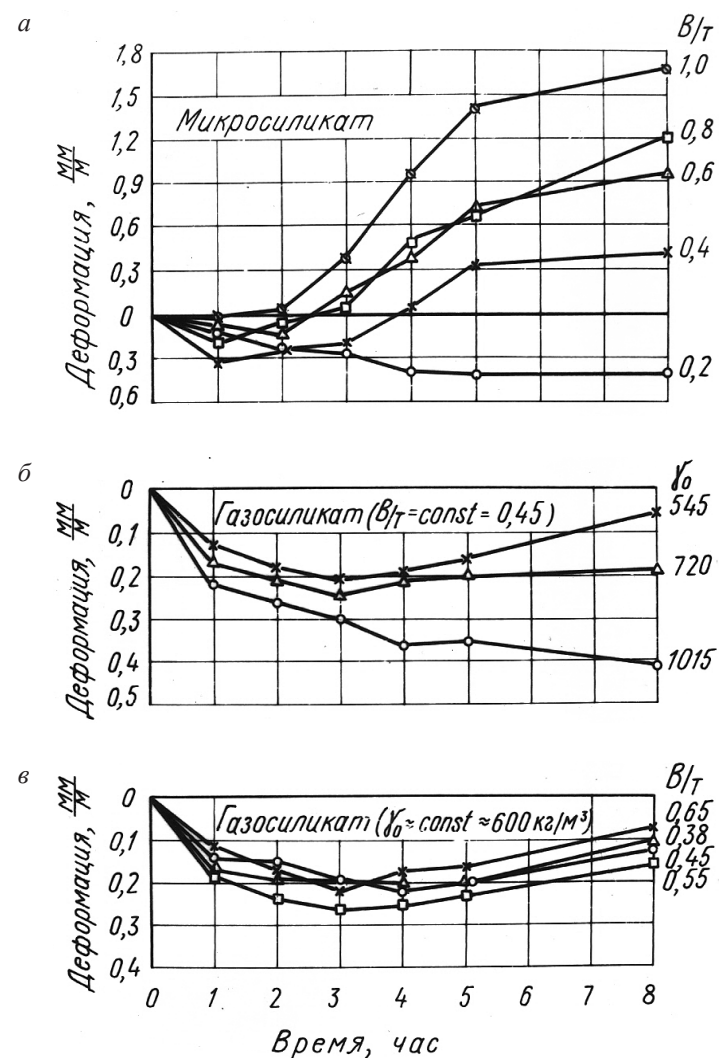


Рис. 4. Деформации водонасыщенных образцов автоклавного микросиликата и газосиликата при замораживании (по данным [18]): а – деформации микросиликата; б – деформации газосиликата плотностями 545 кг/м³; 720 кг/м³ и 1015 кг/м³; в – деформации газосиликата плотностью 600 кг/м³

Прямые испытания на морозостойкость по методике ГОСТ 25485 образцов из газосиликата, газобетона и пенобетона плотностью 590-670 кг/м³ показали, что ячеистый бетон всех указанных видов обладает высокой морозостойкостью. Так, образцы из газобетона и пенобетона выдержали 200 циклов попеременного замораживания и оттаивания с небольшой потерей в весе (2,8-4,4%) и снижением прочности 6% (у пенобетона) и 25% (у газобетона). Для сравнения газосиликат после 35 циклов показал потерю в весе 2,8%, а снижение прочности – 12%.

Кроме этого, результаты испытаний образцов с дисперсным армированием асбестовым волокном свидетельствуют о том, что введение волокнистых добавок в количестве 4%

(по массе) не приводит к снижению морозостойкости, несмотря на некоторое повышение V/T -фактора, а в некоторых случаях (в частности, для пенобетона) даже, наоборот, была зафиксирована нулевая потеря массы после 35 циклов замораживания и оттаивания.

Внешний вид образцов после 200 циклов попеременного замораживания и оттаивания остался неизменным, без явных признаков разрушения (рис. 5).

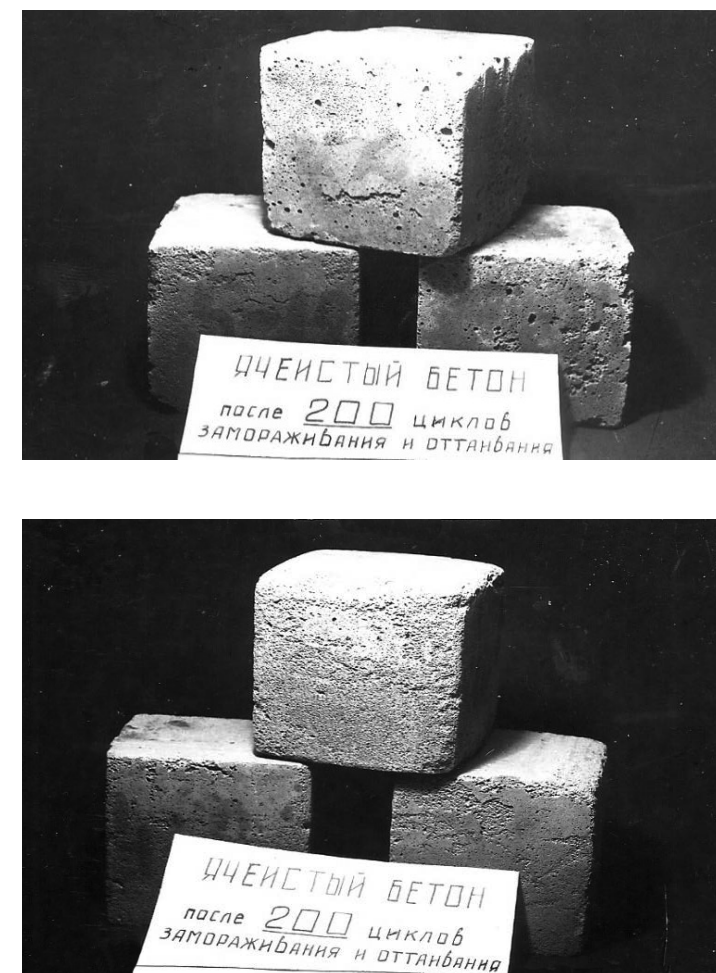


Рис. 5. Образцы ячеистого бетона, после 200 циклов попеременного замораживания и оттаивания (по данным [18]): а – без добавки асбестового волокна; б – с добавкой асбестового волокна

Выводы и рекомендации

1. Установлено, что для снижения влажностной усадки, снижения напряжений в поверхностном слое и повышения трещиностойкости бетона структура его порового пространства должна включать минимально возможное количество микропор радиусом 50-1000 Å, а также обладать определенными диффузионными свойствами, обеспечивающими минимальный влажностный градиент между внутренними и поверхностными слоями.

2. Исследования на морозостойкость показали различие в деформационных свойствах ячеистого бетона разных плотностей при воздействии отрицательных температур на водонасыщенные и высушенные образцы, которое следует учитывать при оценке морозостойкости изделий и конструкций из ячеистого бетона.

Кроме этого, дисперсное армирование ячеистого бетона не приводит к снижению его морозостойкости даже при некотором повышении В/Т-фактора, необходимом для компенсации снижения реологических характеристик бетона при введении фибрового волокна.

Список литературы

- ГОСТ 10060-2012 Бетоны. Методы определения морозостойкости.
- ГОСТ 12852.5-2020 Бетон ячеистый. Методы определения коэффициента паропроницаемости (проект).
- ГОСТ 25485-89 Бетоны ячеистые. Технические условия.
- ГОСТ 25485-2019 Бетоны ячеистые. Общие технические условия.
- ГОСТ 25898-2012 Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию.
- ГОСТ 32303-2011 (EN 13469:2001) Изделия теплоизоляционные, применяемые для инженерного оборудования зданий и промышленных установок. Метод определения характеристик паропроницаемости цилиндров заводского изготовления.
- ГОСТ EN 12086-2011 Изделия теплоизоляционные, применяемые в строительстве. Метод определения характеристик паропроницаемости.
- СТБ EN ISO 12572-2008 Теплотехнические свойства строительных материалов и изделий. Определение паропроницаемости.
- ТКП 45-2.04-43-2006 Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования.
- БС 5250:1989 Британский стандартный кодекс установившейся практики по контролю конденсации в строительстве.
- DIN EN ISO 12524:2000; Deutsche Fassung EN 12524:2000 Baustoffe und -produkte – Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte.
- DIN 4108-4 Теплотехника в строительстве высотных зданий. Тепло-влагозащитные характеристики.
- DIN 1745 Метод определения расчетных значений тепловой защиты. Каменная кладка и ее продукты.
- EN 771-4-2003 Требования к строительным блокам из автоклавного ячеистого бетона.
- DIN 4108-3 Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung» (Ausgabe 2018-10).
- СП.50.13330-2012 Тепловая защита зданий.
- Гоманн М. Поробетон: руководство / Пер. с нем. Под ред. А.С. Коломацкого, Белгород: Изд-во ЛитКараВан, 2010. – 272 с.
- Крохин А.М. Автоклавный ячеистый бетон с повышенной прочностью при растяжении / Дисс. ... канд. техн. наук. М., 1979.
- Галкин С.Л., Сажнев Н.П., Соколовский Л.В., Сажнев Н.Н. Применение ячеистобетонных изделий. Теория и практика. – Минск: «Стринко», 2006. 448 с.

20. Батяновский Э.И., Голубев Н.М., Сажнев Н.Н. Производство ячеистобетонных изделий автоклавного твердения: пособие. – Минск: «Стринко», 2009. 128 с.

21. Строчки В.Н., Зимин С.Г., Жоробаев С.С., Крохин А.М. Сорбционная влажность и паропроницаемость ячеистого бетона // Вестник НИЦ «Строительство». 2020. №4(27). С. 117-125.

Информация об авторах/Information about authors

Валерий Николаевич СТРОЦКИЙ, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории коррозии и долговечности бетона и железобетона НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва.

Valeriy STROTSKIY, Ph.D. (Engineering), Leading Researcher of the Laboratory of corrosion and durability of concrete and reinforced concrete of NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: np.ots@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-78-91

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

Aleksey KROKHIN, Ph.D. (Engineering), Deputy General Director of LLC Holdingvibropress, Moscow

e-mail: veter1790@mail.ru

Владимир Иванович САВИН, канд. техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории коррозии и долговечности бетона и железобетона НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва.

Vladimir SAVIN, Ph.D. (Engineering), Chief Researcher of the Laboratory of corrosion and durability of concrete and reinforced concrete of NIIZHB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: vlsavin@inbox.ru

тел.: +7 (499) 174-76-31