

Для цитирования: Апкаров Ш.И., Батаев Д.К.-С., Газиев М.А., Мажиев Х.Н. Оценка трещиностойкости ячеистобетонных изделий и конструкций при влажностных и карбонизационных деформациях с учетом релаксации напряжений. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017;44 (2):151-161. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-2-151-161

For citation: Apkarov Sh.I., Bataev D.K.-S., Gaziev M. A., Mazhiev Kh.N. Assessment of cracking resistance of cellular concrete products under moisture and carbonisation deformations with stress relaxation. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017;44 (2):151-161. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-151-161

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 691.327.332-333

DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-2-151-161

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЯЧЕИСТОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ВЛАЖНОСТНЫХ И КАРБОНИЗАЦИОННЫХ ДЕФОРМАЦИЯХ С УЧЕТОМ РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ

Апкаров Ш.И.⁴, Батаев Д. К.-С.¹, Газиев М.А.³, Мажиев Х.Н.²

^{1-2,4}Комплексный научно-исследовательский институт

имени Х.И.Ибрагимова Российской академии наук,

^{1-2,4}364051, г.Грозный, Старопромысловское шоссе, 21а,

³Грозненский государственный нефтяной технический университет

имени академика М.Д.Миллионщикова,

³364905, г.Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100,

¹⁻²e-mail: kniiran@mail.ru, 3e-mail: mgaziev56@mail.ru,

4e-mail: apkarov.shamil@mail.ru

Резюме. Цель. Целью работы является разработка мероприятий технологического характера для повышения эксплуатационной трещиностойкости наружных поверхностных слоев конструкций за счет снижения влажностной и карбонизационной усадки ячеистого бетона путем введения в его состав необходимого по расчету крупного или мелкого пористого заполнителя на стадии изготовления. **Метод.** Применен ряд аналитических уравнений, которые устанавливают зависимость усадки тяжелого бетона обычного твердения от количества введенного заполнителя и модуля его упругости, водоцементного отношения и расхода цемента, а также от влажностного состояния бетона. **Результат.** Зная объемы структурного заполнителя и ячеистобетонной массы, а также их модули упругости, рассчитан коэффициент снижения усадки ячеистого бетона при добавке легкого пористого заполнителя, а затем определены предельно допустимые по трещиностойкости усадочные деформации бетона в поверхностном слое наружной ограждающей конструкции вследствие влагообменных и карбонизационных воздействий в условиях эксплуатации с учетом релаксации растягивающих напряжений за счет ползучести бетона. **Вывод.** Теоретические расчеты, выполненные на основе рекомендуемого метода оценки трещиностойкости ячеистобетонных ограждающих конструкций при влагообменных и карбонизационных процессах, с учетом релаксации усадочных напряжений показали, что для исключения в стадии эксплуатации появления трещин в стеновых панелях толщиной 280 мм из газозолотобетона плотностью 700 кг/м³ с модулем упругости 2500 МПа, необходимо керамзита или гранулированного шлака 70-80 %, а каменной крошки (или дробленого камня из гранита или мрамора) в пределах 50-60 % от объема ячеистого бетона в поверхностном слое 30-50 мм.

Ключевые слова: ячеистые бетоны, трещиностойкость, влажностная усадка, карбонизационная усадка, легкий заполнитель, градиент влажности, степень карбонизации, ползучесть, релаксация напряжений

TECHNICAL SCIENCE

BUILDING AND ARCHITECTURE

ASSESSMENT OF CRACKING RESISTANCE OF CELLULAR CONCRETE PRODUCTS UNDER MOISTURE AND CARBONISATION DEFORMATIONS WITH STRESS RELAXATION

*Shamil' I. Apkarov*⁴, *Dena K.-S. Bataev*¹, *Gaziev M.A.*³, *Khasan N. Mazhiev*²

^{1-2,4} *H.I. Ibragimov Complex Scientific-Research Institute,*

Russian Academy of Sciences,

21a, Staropromyslovskoye Shosse, Grozny 364051, Russia,

³ *M.D. Millionshchikov Grozny State Oil Technical University,*

100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 3364905, Russia,

¹⁻² *e-mail: kniiran@mail.ru,* ³ *e-mail: mgaziev56@mail.ru,* ⁴ *e-mail: apkarov.shamil@mail.ru*

Abstract Objectives On the basis of the experimental, theoretical and field studies, an engineering calculation method was developed for assessing the cracking resistance of external enclosing constructions made of cellular concrete, with the maximum gradient development of moisture and carbonisation forced deformations along their thickness, taking into account the relaxation of the shrinkage stresses. In this regard, the aim of the work is to provide technological measures at the manufacturing stage in order to increase the operational cracking resistance of the construction's outer surface layers by reducing the moisture and carbonation shrinkage of cellular concrete by introducing a large or fine porous aggregate in calculated amounts. **Methods** A number of analytical equations were applied to establish the dependence of the shrinkage of heavy concrete of conventional hardness on the amount of aggregate introduced and its elasticity modulus, water-cement ratio and cement consumption, as well as the concrete's moisture content. **Results** Knowing the volumes of the structural aggregate and the cellular concrete mass, as well as their modulus of elasticity, the shrinkage reduction factor of the cellular concrete was calculated with the addition of a lightweight porous aggregate. Subsequently, the shrinkage deformations of concrete in the surface layer of the outer enclosing construction, maximising crack resistance due to moisture exchange and carbonation influences under operating conditions, were defined, taking into account the relaxation of tensile stresses due to creep of concrete. **Conclusion** Theoretical calculations, based on the recommended method of assessing the cracking resistance of cellular concrete enclosing constructions under moisture exchange and carbonisation processes, taking into account the relaxation of shrinkage stresses, showed that in order to exclude the appearance of cracks in wall panels 280 mm thick made of 700 kg/m³ gas ash concrete with elasticity modulus of 2500 MPa, it is necessary to have 70-80% of keramzite or granulated slag, and 50-60% of stone crumb (granite or marble crushed stone) of the volume of cellular concrete in the surface layer of 30-50 mm.

Keywords: cellular concretes, cracking resistance, moisture shrinkage, carbonisation shrinkage, lightweight aggregate, moisture gradient, degree of carbonisation, creep, stress relaxation

Введение. Высокие теплозащитные и строительно-эксплуатационные показатели наружных ограждающих изделий и конструкций из ячеистого бетона, низкая энергоемкость их производства, а также практически неограниченная сырьевая база различных промышленных отходов и вторичных ресурсов, обуславливают эффективность этого материала и всевозрастающий интерес к нему со стороны проектировщиков и строителей.

В эксплуатационных условиях на ячеистобетонных изделиях и конструкциях возможно образование трещин, обусловленных карбонизационно-влажностными воздействиями и склонностью бетона к трещинообразованию вследствие самопроизвольных деформаций усадки.

Постановка задачи. Конструкционная трещиностойкость ячеистого бетона в крупно-размерных изделиях, определяемая его эксплуатационной деформируемостью при влагообменных и карбонизационных процессах, по мнению Е.С.Силаенкова, Е.М.Чернышова и Г.С.Славчевой, является основным и определяющим критерием (критическим свойством) для долговечности ячеистобетонных конструкций [1- 3,5].

Они рассматривают механизм влажностных деформаций через изменение напряженного состояния материала в результате действия сил связи его твердой фазы и порового пространства с водой, а механизм карбонизационных деформаций раскрывается в рамках макрокинетики физико-химических гетерогенных процессов взаимодействия структуры углекислотой воздуха.

Показано, что основными причинами карбонизационной усадки автоклавного ячеистого бетона являются собственные напряжения кристаллического сростка и преобразования геля кремнекислоты, выделившегося при карбонизации гидросиликатов кальция. При этом мера деформирования и деструкции материала зависит от степени карбонизации и величины ее градиента по толщине строительной конструкции. Сформулированы структурные факторы управления эксплуатационной деформируемостью макропористого (ячеистого) бетона, приведена система рецептурно-технологических факторов их регулирования, а также разработаны алгоритмы конструирования для них оптимальных параметров состава и структуры твердой фазы и порового пространства по комплексу задаваемых свойств.

Проведенные нами натурные обследования и экспериментально-теоретические исследования влияния фактора карбонизации на напряженно-деформированное состояние ячеистобетонных стеновых панелей с учетом ползучести материала показали, что процессы карбонизации ячеистого бетона по толщине ограждающих конструкций протекают неравномерно, и в их поверхностных слоях могут образоваться усадочные трещины при условии, если значения собственных растягивающих напряжений в этих слоях превысят предел прочности бетона на растяжение [6].

В связи с этим становится актуальным дальнейшее совершенствование методов расчета для оценки эксплуатационной трещиностойкости изделий и конструкций из автоклавных ячеистых бетонов в целях повышения их долговечности и надежности.

Как известно, введение крупного или мелкого легкого заполнителя в ячеистый бетон уменьшает его усадку и повышает трещиностойкость.

Так, согласно ранее проведенным в Уральском ПромстройНИИпроекте и НИИЖБ им.А.А.Гвоздева исследованиям под руководством Е.С.Силаенкова и Л.М.Розенфельда было установлено, что добавка в ячеистый бетон, мелкого или крупного легкого заполнителя, различного по виду, количеству и размеру, не только повышает его стойкость при переменном замораживании и оттаивании, увлажнении и высушивании, но и в два-три раза уменьшает влажностные и карбонизационные усадочные деформации [4].

Методы исследования. В научной литературе имеются ряд аналитических уравнений, полученных С.В. Александровским, Г.В. Вишневецким, Р. Лермитом и А.Е.Шейкиным, которые устанавливают зависимость усадки тяжелого бетона обычного твердения от количества введенного заполнителя и модуля его упругости, водоцементного отношения и расхода цемента, а также от влажностного состояния бетона [7-10].

Анализ указанных зависимостей, выполненный Е.С. Силаенковым, показал, что наиболее близко отвечает особенностям ячеистого бетона формула, предложенная Г.Д. Вишневецким [4].

Однако для применения данной формулы, целесообразно представить частичку ячеистого бетона с заполнителем в виде системы, где в центре находится сферическая гранула пористого заполнителя, а вокруг нее оболочка из ячеистого бетона (рис. 1).

Такая схема реально учитывает форму легкого заполнителя и тот участок ячеистого бетона, на который распространяется влияние заполнителя.

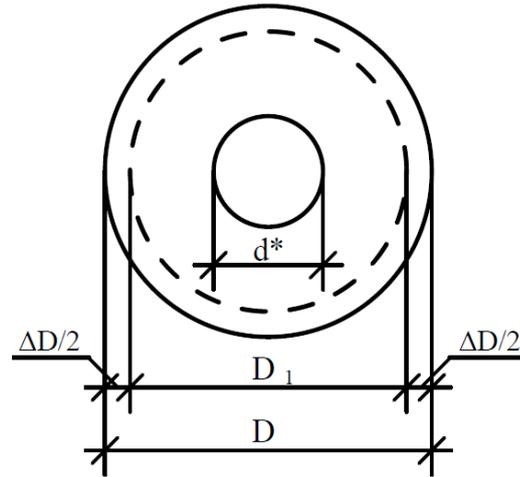


Рис. 1. Схема частицы ячеистого бетона с гранулой мелкого пористого заполнителя
Fig. 1. Diagram of particles of cellular concrete with a small granule of a porous filler

d^* – диаметр гранулы заполнителя;
 D – начальный диаметр системы (ячеистый бетон+заполнитель);
 D_1 – диаметр деформированной системы.

Из условий совместной работы ячеистобетонной оболочки и пористого заполнителя можно записать:

$$kE_3S_3\varepsilon_3 = E_{\text{я}}(\varepsilon_{\text{я}} - \varepsilon_3) F_{\text{я}}, \quad (1)$$

где, k – эмпирический коэффициент, учитывающий степень вовлечения заполнителя в совместную деформацию с ячеистобетонной оболочкой; при добавке заполнителя до 20% по объему $k = 1$, при большей добавке $k = 0,8$;

E_3 и $E_{\text{я}}$ – модули упругости заполнителя и ячеистого бетона;

ε_3 – относительная деформация заполнителя;

$\varepsilon_{\text{я}}$ – относительная деформация (усадка или набухание) ячеистого бетона;

S_3 – поверхность полусферы заполнителя, соприкасающаяся с ячеистым бетоном;

$F_{\text{я}}$ – площадь диаметрального сечения ячеистобетонной оболочки.

Разделив обе части уравнения (1) на E_3S_3 и сделав преобразования, получим по аналогии с формулой Г.Д. Вишневецкого следующую аналитическую зависимость между усадкой ячеистого бетона и количеством пористого заполнителя:

$$\varepsilon_6 = \varepsilon_{\text{я}} \frac{1}{M} \left[(M - 1) + \frac{M^2 - 1}{2k\psi + (M^2 - 1)} \right], \quad (2)$$

здесь ε_6 – относительная деформация (усадка или набухание) ячеистого бетона с заполнителем;

$\varepsilon_{\text{я}}$ – усадка ячеистого бетона;

$\psi = E_3/E_{\text{я}}$;

$$M = \sqrt[3]{1 + \theta}; \theta = v_{\text{я}}/v_3,$$

$v_{\text{я}}$ и v_3 – объемы ячеистобетонной оболочки и заполнителя.

Обозначив выражение

$$\frac{1}{M} \left[(M - 1) + \frac{M^2 - 1}{2k\psi + (M^2 - 1)} \right] = f, \quad (3)$$

$$\text{окончательно получим: } \varepsilon_6 = f \varepsilon_{\text{я}}, \quad (4)$$

где f – коэффициент снижения усадки.

На рис. 2 приведены результаты теоретических вычислений, показавших, что аналитическая зависимость в виде формулы (3) близко отвечает экспериментальным данным, полученным при исследовании влияния пористого заполнителя на усадку ячеистых бетонов при высушивании и карбонизации.

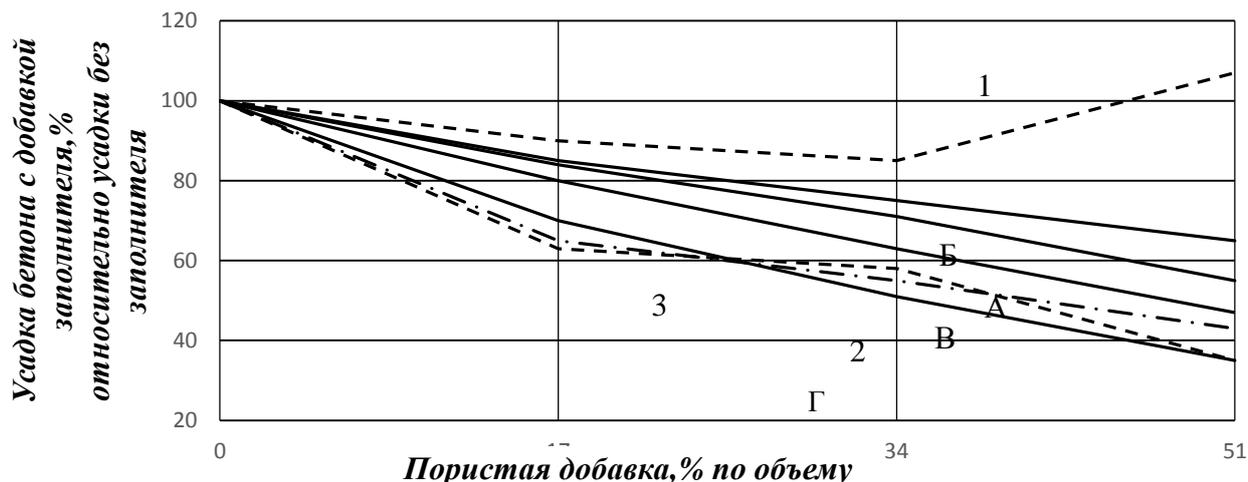


Рис. 2. Зависимость усадки ячеистого бетона от вида и количества мелкого пористого заполнителя

Fig. 2. The dependence of the shrinkage of the cellular concrete, the type and number of small porous filler

А, Б, В, Г – зависимость, определенная соответственно по формулам Лермита, Александровского, Вишневецкого (3);

1, 2, 3 – экспериментальные кривые, полученные при добавке соответственно дробленого пенобетона, керамзита и гранулированного шлака

А, Б, В, Г - dependence, determined, respectively, according to the formulas of Lermite, Aleksandrovsky, Vishnevetsky (3);

1, 2, 3 - experimental curves obtained with the addition of crushed concrete, claydite and granulated slag, respectively

Обсуждение результатов. Зная объемы структурного заполнителя и ячеистобетонной массы, а также их модули упругости, можно подсчитать коэффициент снижения усадки ячеистого бетона при добавке легкого пористого заполнителя, а затем определить предельно допустимые по трещиностойкости усадочные деформации бетона в поверхностном слое наружной ограждающей конструкции вследствие влагообменных и карбонизационных воздействий в условиях эксплуатации (при максимальном перепаде между характеристиками состояния материала на поверхности панели и в ее середине) с учетом релаксации растягивающих напряжений за счет ползучести бетона.

Рассмотрим симметричное изменение характеристики состояния материала по толщине панели. Такое протекание процесса характерно при карбонизации и для высыхания ячеистобетонных панелей в условиях их эксплуатации. При этом развитие собственных напряжений от вынужденных деформаций во времени характеризуется двумя этапами.

Первый – когда эти напряжения растут в связи с увеличением перепада между характеристиками состояния материала на поверхности панели и в ее середине.

Второй этап – когда после достижения своего максимума характеристики состояния материала начинают выравниваться по толщине панели, что ведет к уменьшению этих напряжений. Естественно, что наибольший интерес с точки зрения оценки трещинообразования ячеистобетонных ограждающих конструкций имеет именно первый этап, и его мы и будем рассматривать.

Графики распределения влажности и степени карбонизации по толщине газозобетонных и газобетонных панелей в различные сроки эксплуатации (рис.3), построенные по значениям, полученным при многолетних натурных исследованиях жилых объектов в Свердловске и Перми, послужили расчетной схемой для определения закона их изменения с учетом максимального перепада в слоях панелей [11-12].

Градиентное состояние материала по влажности и степени карбонизации в ограждении обуславливают неравномерность деформации бетона по сечению панели с возможным трещинообразованием в ее поверхностных слоях из-за усадочных напряжений [6, 15,17-21].

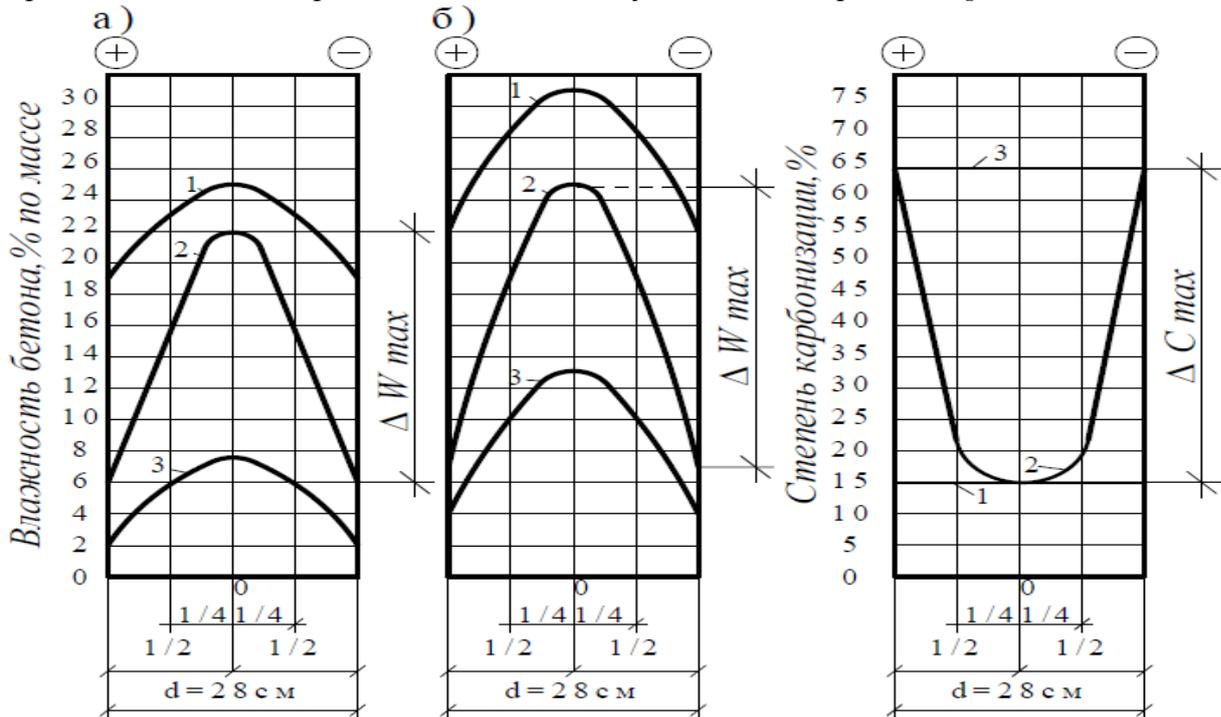


Рис. 3. Распределение влажности и карбонизации по сечению панелей в эксплуатационных условиях

Fig. 3. Distribution of humidity and the carbonization of the cross section of panels in a production environment

а – влажность газобетонных панелей; *б* – влажность газозобетонных панелей; 1 – начальное положение; 2 – положение, соответствующее максимальному градиенту; 3 – стабилизированное состояние

Упруго-мгновенные напряжения, возникающие в поверхностных слоях панели от неравномерных вынужденных деформаций, вызванных влагообменными и карбонизационными процессами, можно определить методами теории упругости, например, по формуле:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{\eta_{w,c} E}{1-\mu} \left[-\Delta W_{(z)} + \frac{12z}{d^3} \int_{-\frac{d}{2}}^{+\frac{d}{2}} \Delta W_{(z)} z dz + \frac{1}{d} \int_{-\frac{d}{2}}^{+\frac{d}{2}} \Delta W_{(z)} dz \right], \quad (5)$$

где, σ_{xx} и σ_{yy} – нормальные напряжения;

E – модуль упругости бетона;

μ – коэффициент Пуассона;

$\eta_{w,c}$ – коэффициент влажностных или карбонизационных деформаций бетона;

d – толщина панели;

z – координата точки по толщине панели (при расположении центра координат на оси симметрии $z=0$);

$\Delta W_{(z)}$ – изменение влажности по сравнению с начальной.

Если в формулу (5), вместо $\Delta W_{(z)}$ подставить $\Delta C_{(z)}$ (изменение степени карбонизации по сравнению с начальной), то получим напряжение, явившиеся следствием неравномерной карбонизации.

Данная формула получена интегрированием уравнений совместности деформаций для случая плоского напряженного состояния.

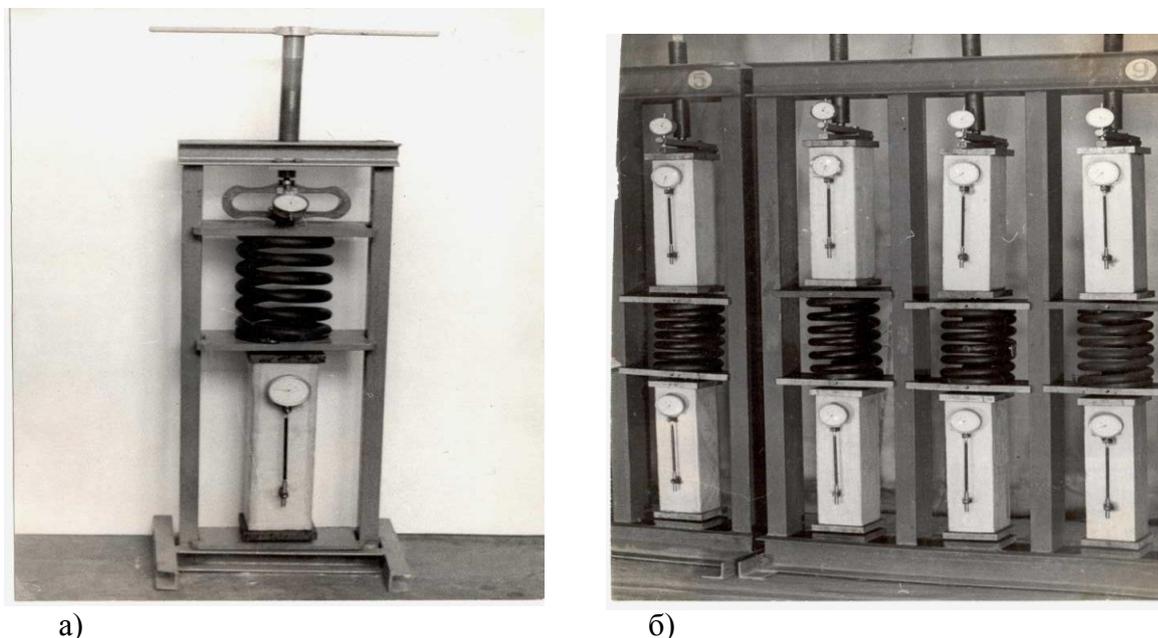
При этом влажностные и карбонизационные процессы приняты протекающими одинаково по всей боковой поверхности панели, т.е. не зависящими от координат x и y , а изменяющимися лишь по толщине z .

Для определения действительных усадочных напряжений при влажностно-карбонизационных деформациях, с учетом влияния на их величину фактора ползучести ячеистого бетона, в формулу (5) вводится коэффициент релаксации (затухания) напряжений, полученный нами в виде следующей функциональной зависимости [13-20]:

$$H(t) = e^{-\varphi(t)}, \quad (6)$$

где, $\varphi(t)$ – характеристика ползучести ячеистого бетона;
 e – основание натурального логарифма;
 t – время испытания на ползучесть, сут.

Характеристика ползучести ячеистого бетона $\varphi(t)$, необходимая для определения теоретических значений коэффициента релаксации напряжений $H(t)$, получена из опытов по исследованию ползучести на призмах-близнецах размерами 10x10x40см, загруженных на длительное испытание одновременно с такими же призмами, на которых исследовался релаксационный процесс с учетом и без учета фактора карбонизации (рис.4).



а) б)
Рис. 4. Пружинные установки для исследования релаксации напряжений (а) и деформации ползучести (б) ячеистых бетонов

Fig. 4. Spring setting to study stress relaxation (a) and creep strain (b) cellular concrete

Для вычисления коэффициентов влажностной усадки η_w и карбонизационной усадки η_c значения коэффициентов релаксации напряжений были приняты равными соответственно 0,6 и 0,3. Эти значения соответствовали срокам испытаний ячеистого бетона на ползучесть в 365 суток (максимальный перепад влажности по сечению панели) и 2000 суток (максимальный перепад степени карбонизации).

Из формулы (5), подставив величину прочности ячеистого бетона при растяжении R_p , вместо $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$, можно найти предельные значения коэффициентов влажностных или карбонизационных деформаций бетона, при которых не будут возникать усадочные трещины.

Для определения η_w и η_c необходимо аппроксимировать опытные кривые изменения градиентов влажности и степени карбонизации по сечению панелей $\Delta W_{(z)}$ и $\Delta C_{(z)}$ (рис. 3).

В нашем случае эти кривые аппроксимируются уравнениями:

$$\begin{aligned} \Delta W_{(z)} &= 4 + 72z^2 - 128z^4; \\ \Delta C_{(z)} &= 853,3z^4 - 13,3z^2, \end{aligned} \quad (7)$$

где, z – координата точки по толщине панели.

После введения в первый множитель формулы (5) коэффициента релаксации напряжений, учитывающего ползучесть бетона и вычисления интегралов, получились следующие зависимости для определения коэффициентов влажностной и карбонизационной усадки:

$$\begin{aligned}\eta_w &= (1 - \mu)R_p / [0,6E(10 - \Delta W_{(z)})]; \\ \eta_c &= (1 - \mu)R_p / [0,3E(4,8 - \Delta C_{(z)})]\end{aligned}\quad (8)$$

Затем, как будут найдены η_w и η_c , необходимо на основании рис. 3, вычислить предельно допустимую деформацию бетона в поверхностном слое стены от влажностных и карбонизационных воздействий ε_w и ε_c :

$$\varepsilon_w = \eta_w \Delta W_{max}, \quad \varepsilon_c = \eta_c \Delta C_{max}\quad (9)$$

Как видно из рис. 3, максимальный градиент по влажности ΔW_{max} для газозолобетона равняется 18%, а для газобетона – 16%, а наибольший перепад по степени карбонизации ΔC_{max} для обоих бетонов составляет 50%. Из двух значений ε_w и ε_c для дальнейших расчетов выберем меньшее.

Это можно сделать, так как оба значения предельной деформации определены исходя из условия: напряжение в поверхностном слое панели от неравномерного высыхания или карбонизации не должно превышать R_p .

Такой путь, хотя и является некоторым допущением, но значительно упрощает решение прикладных задач. Вместе с тем, выбор для дальнейших операций меньшего значения допустимых деформаций идет в запас трещиностойкости.

Для того чтобы определить количество заполнителя, при котором деформации поверхностного слоя панели не будут превосходить допустимые деформации, найденные по уравнениям (9), вычислим сначала коэффициент снижения усадки f , исходя из формулы (4):

$$f = \varepsilon_p / \varepsilon_{я},$$

где, $\varepsilon_{я}$ – усадка ячеистого бетона в эксплуатационных условиях;

ε_p – допускаемое значение деформации бетона ε_w или ε_c , определенное по формулам (9).

Далее, по формуле (3) находим

$$M_3 = \sqrt[3]{1 + \theta} \text{ и } \theta = v_{я} / v_3, \quad (10)$$

где, $v_{я}$ – объем ячеистобетонной массы, v_3 – объем структурного заполнителя.

Из соотношения $v_{я} / v_3$ определяем расход соответствующего мелкого или крупного пористого заполнителя, который обеспечит требуемую по трещиностойкости в условиях эксплуатации конструкционную усадку ячеистого бетона ε_{σ} .

Вывод. Теоретические расчеты, выполненные нами на основе вышеизложенного метода оценки трещиностойкости ячеистобетонных ограждающих конструкций при влагообменных и карбонизационных процессах, с учетом релаксации усадочных напряжений показали, что для исключения в стадии эксплуатации появления трещин в стеновых панелях толщиной 280мм из газозолобетона плотностью 700 кг/м³ с модулем упругости 2500 МПа, необходимо керамзита или гранулированного шлака 70-80 %, а каменной крошки (или дробленого камня из гранита или мрамора) в пределах 50-60 % от объема ячеистого бетона в поверхностном слое 30-50 мм.

В практике жилищного строительства отделка ячеистобетонных панелей каменными дроблеными материалами широко использовалась с 1961 г. на Среднем Урале и в других регионах России.

Натурные исследования этой отделки, проведенные Уральским ПромстройНИИпроектом и Воронежским ИСИ на протяжении 25-40 лет, показали, что отделка каменным дробленным материалом в 1,5-2 раза уменьшает градиент вынужденных деформаций по сечению панелей из газозолобетона и газосиликата при изменении их влажности или карбонизации, и за этот период эксплуатации свойства отделки не ухудшились, на ней нет никаких трещин и дефектов и она не требует ремонта.

Библиографический список:

1. Силаенков Е.С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
2. Чернышов Е.М., Славчева Г.С. Управление эксплуатационной деформируемостью и трещиностойкостью макропористых (ячеистых) бетонов Ч.1/ Контекст проблемы и вопросы теории// Строительные материалы. 2014 №1. С.105-112.
3. Повышение долговечности конструкций и изделий из мелкозернистых ячеистых бетонов при эксплуатационных воздействиях / Силаенков Е.С., Батаев Д.К.-С., Мажиев Х.Н., Гагиев М.А. Грозный, 2015. 355 с.
4. Силаенков Е.С. Повышение долговечности панелей из ячеистых бетонов. М.: Стройиздат, 1965. 215с.
5. Славчева Г.С., Чернышев Е.М. Алгоритм конструирования структуры цементных пенобетонов по комплексу задаваемых свойств// Строительные материалы. 2016. № 9. С. 58-64.
6. Батаев Д.К.-С., Гагиев М.А., Пинскер В.А., Чепурненко А.С. Теория расчета усадочных напряжений в ячеистобетонных стеновых панелях при карбонизационных процессах с учетом ползучести// Вестник МГСУ. 2016. № 12. С. 11-22.
7. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. М.: Стройиздат, 1973. 417с.
8. Вишневецкий Г.Д. Об усадочных характеристиках бетонов. Труды ЛИСИ. 1952. Вып.13, С.112-117.
9. Лермит Р. Изменение объема бетона // Четвертый международный конгресс по химии цемента. М.: Стройиздат, 1964. С.475-485.
10. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 344 с.
11. Гагиев М.А., Флорова М.Р. Карбонизация и ползучесть газозолобетона в панелях жилых зданий на среднем Урале. / Влияние климатических условий и режимов нагружения на деформации и прочность конструкционных бетонов и элементов железобетонных конструкций// Тбилиси. 1985. С.15-16.
12. Гагиев М.А. Релаксация напряжений в автоклавных ячеистых бетонах с учетом их старения вследствие карбонизации.// Работоспособность композиционных строительных материалов в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов: Межвузовский сборник /КИСИ. Казань. 1985. С.44-46.
13. Релаксация сжимающих напряжений в мелкозернистом ячеистом бетоне/ Батаев Д.К.-С., Мажиев Х.Н., Муртазаев С-А.Ю., Гагиев М.А. // Современные строительные материалы, технологии и конструкции. Грозный, 2015. С.166-171.
14. H.Samouh, E. V.Wishiewski, A.Loukili. Consequences of longer sealed curing on drying shrinkage, cracking and carbonation of concrete. Cement and Concrete Research, Volume 95, May 2017, P. 117-131.
15. G. Li, L. Dong, Zh. Bai, M. Lei, J. Du. Predicting carbonation depth for concrete with organic film coatings combined with ageing effects. Construction and Building Materials, Volume 142, 1 July 2017, P. 59-65.
16. E. Possan, W.A. Thomaz, G.A. Aleandri, E.F. Felix, A.C.P. dos Santos. CO₂ uptake potential due to concrete carbonation. A case study. Case Studies in Construction Materials, Volume 6, June 2017, P. 147-161.
17. V.L. Та, S. Bonnet, T.S. Kiese, A. Ventura. A new meta model to calculate carbonation front depth within concrete structures. Construction and Building Materials, Volume 129, 30 December 2016, P. 172-181.
18. Ekolu S.O. A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete. Construction and Building Materials, Volume 127, 30 November 2016, P. 306-320.
19. Х. Шугуан, В.Ф. Чжоу. Легкие бетоны: Научное издание. – М.: Издательство АСВ, 2016. – 304 с.
20. Ю. Юань, В. Лин, Т. Пе. Высококачественный цементный бетон с улучшенными свойствами. – Москва: Издательство АСВ, 2014. – 448 с.

References:

1. Silaenkov E.S. Dolgovechnost' izdeliy iz yacheistykh betonov. M.: Stroyizdat; 1986. 176 s. [Silaenkov E.S. Durability of cellular concrete products. Moscow: Stroyizdat; 1986. 176 p. (in Russ.)]
2. Chernyshov E.M., Slavcheva G.S. Upravlenie ekspluatatsionnoy deformiruemost'yu i treshchinostoykost'yu makroporistykh (yacheistykh) betonov Ch.1. Kontekst problemy i voprosy teorii. Stroitel'nye materialy. 2014;1:105-112. [Chernyshov E.M., Slavcheva G.S. Exploitational deformation and crack-resistance management of macroporous (cellular) concretes. Part 1. Problem's context and theoretical questions. Stroitel'nye materialy. 2014;1:105-112. (in Russ.)]
3. Silaenkov E.S., Bataev D.K.-S., Mazhiev Kh.N., Gaziev M.A. Povyshenie dolgovechnosti konstruksiy i izdeliy iz melkozernistykh yacheistykh betonov pri ekspluatatsionnykh vozdeystviyakh. Grozny; 2015. 355 s. [Silaenkov E.S., Bataev D.K.-S., Mazhiev Kh.N., Gaziev M.A. The increase of durability of thin-grain cellular concrete constructions and products during exploitational impacts. Grozny; 2015. 355 p. (in Russ.)]
4. Silaenkov E.S. Povyshenie dolgovechnosti paneley iz yacheistykh betonov. M.: Stroyizdat; 1965. 215 s. [Silaenkov E.S. The increase of durability of cellular concrete panels. Moscow: Stroyizdat; 1965. 215 p. (in Russ.)]
5. Slavcheva G.S., Chernyshev E.M. Algoritm konstruirovaniya struktury tsementnykh penobetonov po kompleksu zadavaemykh svoystv. Stroitel'nye materialy. 2016;9:58-64. [Slavcheva G.S., Chernyshev E.M. Algorithm of construction of cement aerated concrete structure based on a set of pre-defined properties. Stroitel'nye materialy. 2016;9:58-64. (in Russ.)]
6. Bataev D.K.-S., Gaziev M.A., Pinsker V.A., Chepurnenko A.S. Teoriya rascheta usadochnykh napryazheniy v yacheistobetonnykh stenovykh panyakh pri karbonizatsionnykh protsessakh s uchetom polzuchesti. Vestnik MGSU. 2016;12:11-22. [Bataev D.K.-S., Gaziev M.A., Pinsker V.A., Chepurnenko A.S. Computational theory of shrinking stresses in cellular concrete wall panels during carbonation processes accounting for creep. Scientific and Engineering Journal for Construction and Architecture. 2016;12:11-22. (in Russ.)]
7. Aleksandrovskiy S.V. Raschet betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksiy na izmeneniya temperatury i vlazhnosti s uchetom polzuchesti. M.: Stroyizdat; 1973. 417 s. [Aleksandrovskiy S.V. Calculaton of concrete and iron-concrete constructions during temperature and humidity alterations accounting for creep. Stroyizdat; 1973. 417 p. (in Russ.)]
8. Vishnevetskiy G.D. Ob usadochnykh kharakteristikakh betonov. Trudy LISI. 1952;13:112-117. [Vishnevetskiy G.D. About the concrete's shrinkage chatacteristics. Work collection of LISI (Leningrad Engineering - Building Institute). 1952;13:112-117. (in Russ.)]
9. Lermi R. Izmenenie ob"ema betona. Chetvertyy mezhdunarodnyy kongress po khimii tsementa. M.: Stroyizdat; 1964. S.475-485. [Lermi R. Concrete's volume alteration. The 4th International congress on cement chemistry. Moscow: Stroyizdat; 1964. P. 475-485. (in Russ.)]
10. Sheykin A.E., Chekhovskiy Yu.V., Brusser M.I. Struktura i svoystva tsementnykh betonov. M.: Stroyizdat; 1979. 344 s. [Sheykin A.E., Chekhovskiy Yu.V., Brusser M.I. tructure and properties of cement concretes. Moscow: Stroyizdat; 1979. 344 p. (in Russ.)]
11. Gaziev M.A., Florova M.R. Karbonizatsiya i polzuchest' gazozolobetona v panyakh zhilykh zdaniy na srednem Urale. Vliyanie klimaticheskikh usloviy i rezhimov nagruzheniya na deformatsii i prochnost' konstruksionnykh betonov i elementov zhelezobetonnykh konstruksiy. Tbilisi; 1985. S.15-16. [Gaziev M.A., Florova M.R. Carbonation and creep of gas-ash concrete in panels of the Middle Ural's domestic buildings. Climate conditions and loading modes impact onto deformation and strength of constructional concretes and iron-concrete construction elements. Tbilisi; 1985. P.15-16. (in Russ.)]
12. Gaziev M.A. Relaksatsiya napryazheniy v avtoklavnykh yacheistykh betonakh s uchetom ikh stareniya vsledstvie karbonizatsii. Rabotosposobnost' kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov v usloviyakh vozdeystviya razlichnykh ekspluatatsionnykh faktorov. Mezhvuzovskiy sbornik KISI. Kazan'. 1985. S. 44-46. [Gaziev M.A. Stress relaxation in autoclave cellular concretes taking into account their ageing due to carbonation. Operability of composite building materials under the conditions of various exploitation factors. Inter-University work collection of KISI. Kazan'. 1985. P. 44-46. (in Russ.)]
13. Bataev D.K.-S., Mazhiev Kh.N., Murtazaev S-A.Yu., Gaziev M.A. Relaksatsiya szhimayushchikh napryazheniy v melkozernistom yacheistom betone. Covremennye stroitel'nye materialy, tekhnologii i konstruksii. Grozny; 2015. S.166-171. [Bataev D.K.-S., Mazhiev Kh.N., Murtazaev S-A.Yu., Gaziev

- M.A. Compressing stress relaxation in fine-grained cellular concrete. Modern building materials, technologies and constructions. Grozny; 2015. P.166-171. (in Russ.)
14. Samouh H., Wishiewski E. V., Loukili A. Consequences of longer sealed curing on drying shrinkage, cracking and carbonation of concrete. Cement and Concrete Research. 2017;95:117-131.
 15. Li G., Dong L., Bai Zh., Lei M., Du J.. Predicing carbonation depth for concrete with organic film coatings combined with ageing effects. Construction and Building Materials. 2017;142:59-65.
 16. Possan E., Thomaz W.A., Aleandri G.A., Felix E.F., dos Santos A.C.P. CO₂ uptake potential due to concrete carbonation. A case study. Case Studies in Construction Materials. 2017;6:147-161.
 17. Ta V.L., Bonnet S., Kiese T.S., Ventura A.. A new meta model to calculate carbonation front depth within concrete structures. Construction and Building Materials. 2016;129:172-181.
 18. Ekolu S.O. A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete. Construction and Building Materials. 2016;127:306-320.
 19. Shuguan Kh., Chzhou V.F. Legkie betony. M.: Izdatel'stvo ASV; 2016. 304 s. [Shuguan Kh., Chzhou V.F. Light concretes. Moscow: Izdatel'stvo ASV; 2016. 304 p. (in Russ.)]
 20. Yuan' Yu., Lin V., Pe T. Vysokokachestvennyy tsementnyy beton s uluchshennymi svoystvami. Moskva: Izdatel'stvo ASV; 2014. 448 s. [Yuan' Yu., Lin V., Pe T. High-quality cement concrete with improved properties. Moscow: Izdatel'stvo ASV; 2014. 448 p. (in Russ.)]

Сведения об авторах:

Апкаров Шамиль Идрисович – аспирант.

Батаев Дена Карим-Султанович – доктор технических наук, профессор.

Газиев Минкаил Ахметович – кандидат технических наук, доцент.

Мажиев Хасан Нажоевич – доктор технических наук, профессор.

Information about the author:

Shamil' I.Apkarov -Postgraduate Student.

Dena K.-S.Bataev - Dr. Sci. (Technical), Prof.

Minkail A.Gaziev - Cand. Sci.(Technical), Assoc. Prof.,

Khasan N.Mazhiev - Dr. Sci. (Technical), Prof.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 31.05.2017.

Принята в печать 16.06.2017.

Conflict of interest.

Received 31.05.2017.

Accepted for publication 16.06.2017.