

УДК 691.328.32

## ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛНОЙ УСАДКИ КЕРАМЗИТОБЕТОНА

В.А. РЖЕВУЦКАЯ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц. Ю.Г. МОСКАЛЬКОВА<sup>2</sup>  
(Белорусско-Российский университет, Могилев)

ORCID [https://orcid.org/0000-0001-8854-5408<sup>1</sup>, \[https://orcid.org/0000-0002-4107-2452<sup>2</sup>\]\(https://orcid.org/0000-0002-4107-2452\)](https://orcid.org/0000-0001-8854-5408)

В статье выполнен сравнительный анализ существующих расчетных моделей для определения деформаций усадки легкого бетона. Рассмотрены факторы, учитываемые при расчете усадочных деформаций в легких бетонах, для представленных моделей. Объект исследования – керамзитобетон на основе керамзитового гравия. Предмет исследования – деформации свободной усадки керамзитобетона. Приведены результаты экспериментальных исследований относительных деформаций полной усадки керамзитобетона. Выполнено сравнение опытных значений деформаций усадки керамзитобетона с расчетными значениями, полученными согласно рассмотренным моделям, которые приведены в отечественной и зарубежной нормативной литературе или были предложены другими исследователями. В соответствии с полученными результатами установлено, что значения усадочных деформаций, полученные при расчете по рассмотренным моделям, значительно превышают экспериментальные значения, особенно для раннего периода усадки (первые 7 сут). Применение представленных расчетных моделей для определения деформаций усадки керамзитобетона не гарантирует получение корректных значений, что обуславливает проведение дополнительных исследований с целью усовершенствования расчетных моделей.

**Ключевые слова:** усадка, свободная усадка, деформации усадки, объемные деформации, легкий бетон, керамзитобетон.

**Введение.** Различают карбонизационную, аутогенную и усадку при высыхании [1]. Многие исследователи утверждают, что деформации усадки легкого бетона на пористых заполнителях в среднем на 20% больше деформаций усадки равнопрочного бетона нормального веса на плотных заполнителях [2; 3]. В то же время некоторые авторы отмечают, что усадочные деформации легких бетонов относительно малы [4–6].

Принято считать, что усадка протекает неравномерно по объему бетона, распространяясь от поверхности вглубь, соответственно у поверхностных слоев бетона значения деформаций усадки максимальны. В свою очередь, неравномерная усадка характеризуется возникновением новой системы напряжений в цементном камне при высыхании, в результате чего образуются так называемые градиенты влажности и усадочные напряжения [7].

В [8] отмечено, что вследствие неравномерной усадки увеличивается прочность бетона при растяжении. Авторы [9; 10] констатируют, что усадочные деформации различаются по высоте плоских прямоугольных сечений, причем в [9] различия усадочных деформаций объясняются пористостью керамзита, в то время как в [10] явление усадки обосновано неравномерным распределением крупного заполнителя.

Несмотря на многочисленные исследования по данной тематике, результаты исследователей зачастую противоречивы ввиду сложного процесса твердения и усадки керамзитобетона.

**Основная часть.** В соответствии с положениями Eurocode 2 [11] полная относительная усадка бетона  $\varepsilon_{cs}$  складывается из относительной деформации усадки от высыхания  $\varepsilon_{cd}$  и относительной деформации аутогенной усадки  $\varepsilon_{ca}$ :

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}. \quad (1)$$

Относительные деформации усадки, обусловленные высыханием, в любой момент времени  $t$  [11]:

$$\varepsilon_{cd}(t) = \varepsilon_{cd,lim} \cdot \beta_{ds}(t, t_s), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{cd,lim}$  – предельные относительные деформации усадки от высыхания;  
 $\beta_{ds}(t, t_s)$  – функция, описывающая развитие во времени усадки от высыхания.  
Относительные деформации аутогенной усадки во времени [11]:

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \cdot \varepsilon_{ca,lim}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{ca,lim}$  – максимальные относительные деформации аутогенной усадки;  
 $\beta_{as}(t)$  – функция, описывающая влияние времени на величину аутогенной усадки.

В рассмотренной модели предельные значения относительной усадки от высыхания легкого бетона  $\varepsilon_{lcd,lim}$  могут быть определены путем умножения  $\varepsilon_{cd,lim}$  на коэффициент  $\eta_3$  [11]:

$$\varepsilon_{lcd,lim} = \eta_3 \cdot \varepsilon_{cd,lim}, \quad (4)$$

где  $\eta_3$  – поправочный коэффициент для определения усадки при высыхании для легкого бетона.

Исследователями Н. Costa, Е. Júlio, J. Lourenço [12] установлено, что значения полной усадки керамзитобетона с использованием предварительно увлажненного керамзита значительно (в 10 раз) отличаются от расчетных значений, полученных согласно Eurocode 2 [11]. При определении номинального значения  $\varepsilon_{cd,0}$  для получения  $\varepsilon_{lca,lim}$  авторы [12] предложили заменить среднюю прочность бетона на осевое сжатие  $f_{cm}$  прочностью цементной пасты  $f_{c,b}$ . При этом коэффициент  $\eta_3$  может быть определен по формуле:

$$\eta_3 = C_{B/U} / C_{cs}, \quad (5)$$

$$C_{B/U} = 1,7 \cdot (B/U)^{0,8}, \quad (6)$$

$$C_{cs} = \prod_{i=1}^n \left( 1 - \frac{V_{abs,i}}{100} \cdot 0,13 \cdot 0,25^{\rho_{0,i}^{15}} \right), \quad (7)$$

где  $B/U$  – водоцементное отношение;

$V_{abs,i}$  – объем крупного заполнителя в бетонной смеси,  $\text{дм}^3$ ;

$\rho_{0,i}$  – истинная плотность крупного заполнителя,  $\text{кг/дм}^3$ ;

$n$  – количество разных видов крупного заполнителя при проведении исследования.

Согласно расчетной модели, предложенной в [12], прогнозируемая аутогенная деформация легкого бетона:

$$\varepsilon_{lca}(t) = -\varepsilon_{lca,lim} \cdot \left[ 1 - \exp(-0,35 \cdot (t - t_s)^{0,5}) \right], \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{lca,lim}$  – предельная деформация аутогенной усадки легкого бетона, определяемая опытным путем и зависящая от водопоглощения крупного заполнителя;

$t$  – возраст бетона в рассматриваемый период, сут;

$t_s$  – возраст бетона к моменту начала воздушно-сухого хранения, сут.

В соответствии с положениями СП 5.03.01 [13] относительная деформация полной усадки  $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$  состоит из относительной деформации базовой усадки  $\varepsilon_{cbs}(t)$  и относительной деформации усадки высыхания  $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ :

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cbs}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s). \quad (9)$$

В [13] вводится понятие модифицированной усадки, зависящей от  $f_{lcm}$  (в отличие от модели Eurocode 2 [11]). Расчетное значение модифицированной усадки соответствует значению предельной относительной деформации усадки.

Относительные деформации базовой усадки во времени можно рассчитать по формуле:

$$\varepsilon_{cbs}(t) = \varepsilon_{cbs}(f_{lcm}) \cdot \beta_{bs}(t), \quad (10)$$

где  $\varepsilon_{cbs}(f_{lcm})$  – модифицированная относительная деформация базовой усадки;

$\beta_{bs}(t)$  – функция, описывающая влияние времени на величину базовой усадки.

Согласно [13] для определения относительной деформации усадки высыхания предложена зависимость:

$$\varepsilon_{cds}(t, t_s) = \varepsilon_{cds}(f_{lcm}) \cdot \beta \cdot (RH) \cdot \beta_{ds} \cdot (t - t_s), \quad (11)$$

где  $\varepsilon_{cds}(f_{lcm})$  – модифицированная относительная деформация усадки высыхания;

$\beta \cdot (RH)$  – коэффициент, учитывающий влияние относительной влажности на усадку высыхания;

$\beta_{ds} \cdot (t - t_s)$  – функция, описывающая развитие во времени усадки высыхания.

Для нахождения полной усадки легкого бетона в [13] предложена следующая формула:

$$\varepsilon_{lcs}(t, t_s) = \eta \cdot \varepsilon_{cs}(t, t_s), \quad (12)$$

где  $\eta$  – коэффициент, учитывающий класс легкого бетона по прочности на сжатие, применяемый для нахождения полной усадки легкого бетона.

Примечательно, что для модели СП 5.03.01 [13] поправочный коэффициент  $\eta$  умножается на полные значения относительных деформаций усадки бетона  $\varepsilon_{cs}$ , а для модели Eurocode 2 [11] – на предельные относительные усадочные деформации при высыхании  $\varepsilon_{cd,lim}$ .

В ACI 209 R [14] для прогнозирования полной деформации усадки в момент времени  $t$  применяется следующая зависимость:

$$\varepsilon_{cs}(t) = \frac{(t - t_s)}{35 + (t - t_s)} \cdot \varepsilon_{cs,lim}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_{cs,lim} = \gamma_{cs} \cdot 780 \cdot 10^{-6}, \quad (14)$$

где  $\gamma_{cs}$  – поправочный коэффициент, определяемый влажностью, толщиной образца, объемом, удельной площадью поверхности и т.д.

В модели ACI 209 R [14] не учитывается различие между аутогенной усадкой и усадкой при высыхании, результатом расчета является величина полной усадки (с учетом влажностной, аутогенной и карбонизационной). При этом в данной модели отсутствуют какие-либо поправочные коэффициенты для легкого бетона.

На основании опытных данных О.Б. Голишева, А.Н. Бамбуры [15] для определения относительной деформации полной усадки в любой момент времени  $t$  авторами предложена следующая зависимость:

$$\varepsilon_{cs}(t) = \varepsilon_{cs,lim} \cdot (1 - e^{-\lambda_{cs} \cdot t}), \quad (15)$$

где  $\varepsilon_{cs,lim}$  – конечные деформации усадки;

$\lambda_{cs}$  – параметр, характеризующий скорость усадки, сут<sup>-1</sup> (определяется опытным путем).

В соответствии с моделью [15; 16] предельные значения относительных деформаций усадки можно определить по формуле:

$$\varepsilon_{cs,lim} = \varepsilon_{cs}(7) \cdot \xi_{cs1} \cdot \xi_{cs2} \cdot \xi_{cs3}, \quad (16)$$

$$\varepsilon_{cs}(7) = k_s \cdot 10^{-6} (W + V)^{3/2}, \quad (17)$$

где  $\varepsilon_{cs}(7)$  – относительные деформации усадки по истечении 7 суток твердения во влажных условиях;

$k_s$  – коэффициент, учитывающий вид бетона;

$\xi_{cs1}$ ,  $\xi_{cs2}$ ,  $\xi_{cs3}$  – коэффициенты, учитывающие влияние возраста бетона к моменту окончания влажностного хранения, модуль открытой поверхности, влажность окружающей среды соответственно;

$W$  – удельное количество воды затворения в бетонной смеси (по объему), л/м<sup>3</sup>;

$V$  – удельное количество вовлеченного воздуха в уплотненной бетонной смеси (по объему), л/м<sup>3</sup>.

Данная модель [15; 16] предусмотрена для нахождения усадочных деформаций в бетоне нормального веса и мелкозернистом бетоне.

Модель, предложенная Е.М. Бабичем [17], содержит следующую зависимость для определения полной усадки легкого бетона в момент времени  $t$ :

$$\varepsilon_{lcs}(t) = \frac{4t \cdot \varepsilon_{lcs}(100)}{100 + 3t}, \quad (18)$$

$$\varepsilon_{lcs}(100) = 6,7 \cdot 10^{-6} (B \sqrt{C})^{0,5}, \quad (19)$$

где  $\varepsilon_{lcs}(100)$  – относительные деформации усадки в возрасте 100 сут;

$B$  – удельное количество воды затворения (по объему), л/м<sup>3</sup>;

$C$  – удельное количество цемента (по объему), кг/м<sup>3</sup>.

В таблице 1 приведены факторы, учитываемые для расчета деформаций усадки бетона для рассматриваемых моделей [11–17].

Таблица 1. – Факторы, влияющие на усадочные деформации, учитываемые в расчетных моделях [11–17]

Модель	Факторы, влияющие на величину усадки и учтенные в модели
1	2
Модель Eurocode 2 [11]	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вид и класс цемента;</li> <li>– возраст бетона к моменту начала воздушно-сухого хранения;</li> <li>– влажность окружающей среды;</li> <li>– открытый периметр сечения, контактирующий с окружающей средой;</li> <li>– площадь поперечного сечения;</li> <li>– класс легкого бетона по прочности на сжатие;</li> <li>– средняя прочность бетона на осевое сжатие</li> </ul>
Модель Н. Costa, Е. Júlio, J. Lourenço [12]	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вид и класс цемента;</li> <li>– возраст бетона к моменту начала воздушно-сухого хранения;</li> <li>– влажность окружающей среды;</li> <li>– открытый периметр сечения, контактирующий с окружающей средой;</li> <li>– площадь поперечного сечения;</li> <li>– класс легкого бетона по прочности на сжатие;</li> <li>– прочность цементной пасты;</li> <li>– водоцементное отношение;</li> <li>– истинная плотность крупного заполнителя;</li> <li>– объем крупного заполнителя;</li> <li>– количество разных видов крупного заполнителя;</li> <li>– предельная деформация аутогенной усадки (по опытным данным), зависящая от водопоглощения крупного заполнителя</li> </ul>

Окончание таблицы 1

1	2
Модель СП.5.03.01 [13]	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вид и класс цемента;</li> <li>– возраст бетона к моменту начала воздушно-сухого хранения;</li> <li>– влажность окружающей среды;</li> <li>– открытый периметр сечения, контактирующий с окружающей средой;</li> <li>– площадь поперечного сечения;</li> <li>– класс легкого бетона по прочности на сжатие;</li> <li>– средняя прочность бетона на осевое сжатие</li> </ul>
Модель ACI 209 R [14]	<ul style="list-style-type: none"> <li>– срок хранения образца перед началом испытания;</li> <li>– влажность окружающей среды;</li> <li>– средняя толщина элемента;</li> <li>– отношение объема к поверхностной площади элемента;</li> <li>– температура окружающей среды;</li> <li>– осадка конуса;</li> <li>– удельное количество мелкого заполнителя в бетонной смеси (по объему бетонной смеси);</li> <li>– удельное количество цемента (по объему бетонной смеси);</li> <li>– удельное количество вовлеченного воздуха в уплотненной бетонной смеси (по объему)</li> </ul>
Модель О.Б. Голишева, А.Н. Бамбуры [15; 16]	<ul style="list-style-type: none"> <li>– относительные деформации усадки по истечении 7 суток твердения во влажных условиях;</li> <li>– вид бетона;</li> <li>– возраст бетона к моменту окончания влажностного хранения;</li> <li>– модуль открытой поверхности элемента;</li> <li>– скорость усадки, определяемая опытным путем;</li> <li>– влажность окружающей среды;</li> <li>– удельное количество воды затворения;</li> <li>– удельное количество воздуха в уплотненной бетонной смеси</li> </ul>
Модель Е.М. Бабича [17]	<ul style="list-style-type: none"> <li>– удельное количество воды затворения (по объему бетонной смеси);</li> <li>– удельное количество цемента (по объему бетонной смеси);</li> <li>– относительные деформации усадки при <math>t = 100</math> сут</li> </ul>

Примечательно, что модель, предложенная в СП 63.13330.2018 [18], не дает никаких рекомендаций для легкого бетона, причем значения конечных усадочных деформаций зависят только от класса бетона по прочности на сжатие.

В настоящем исследовании объект исследования – керамзитобетон на основе керамзитового гравия. Предметами исследования являются деформации свободной усадки керамзитобетона, анализ существующих моделей для определения усадочных деформаций.

Сравнительная оценка расчетных моделей в настоящем исследовании выполнена на основании эмпирических данных, полученных по результатам испытания опытных образцов-призм из керамзитобетона.

Основные материалы для приготовления керамзитобетонной смеси:

- керамзитовый гравий (истинная плотность 2,35 г/см<sup>3</sup>, фракция 4–10 мм);
- речной песок (истинная плотностью 2,46 г/см<sup>3</sup>, модуль крупности 2,13);
- нормально твердеющий портландцемент марки ПЦ 500-Д0 (прочности на сжатие 42,5 МПа).

Осадка конуса составила 130 мм.

Состав керамзитобетонной смеси представлен в таблице 2.

Таблица 2. – Состав керамзитобетонной смеси

Расход на 1 м <sup>3</sup> смеси, кг			В/Ц
Вязущее (портландцемент марки ПЦ 500-Д0)	Крупный заполнитель (керамзитовый гравий фракции 4–10 мм)	Мелкий заполнитель (речной песок с модулем крупности 2,13)	
428	338	787	0,52

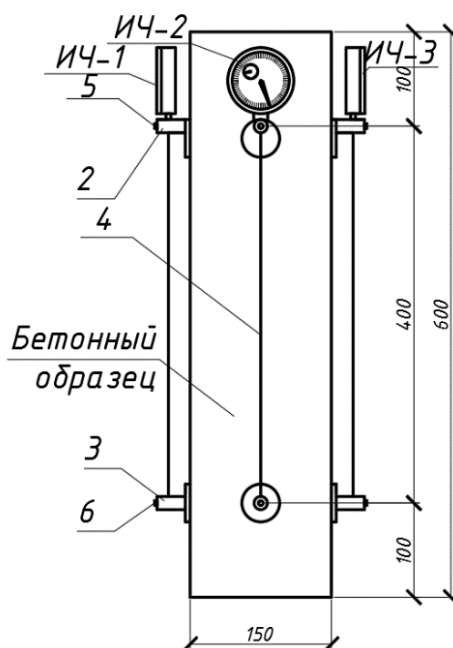
На основании проведенных испытаний средняя прочность керамзитобетона на осевое сжатие  $f_{lcm}$  составила 13,79 МПа.

Исследования по определению деформаций усадки проводились по методике, предложенной в [19], на опытных призмных образцах с размерами поперечного сечения 150×150 мм, высотой 600 мм. Деформации свободной усадки замерялись при помощи индикаторов часового типа на каждой грани образца (рисунок 1). Количество образцов в серии составило 3 штуки. Фиксирование деформаций началось с 1 суток.

В период выполнения испытаний поддерживался нормальный температурно-влажностный режим: средняя температура 22 °С, средняя относительная влажность воздуха 55%. Продолжительность исследования составила 120 сут.

Скорость нарастания и предельные значения полной усадки керамзитобетона рассчитывались в соответствии с [19]. Согласно экспериментальным данным скорость усадки керамзитобетона для составила 88 сут.

С целью проверки корректности расчетных значений полных деформаций усадки керамзитобетона, полученных по результатам расчета согласно рассмотренным моделям [11–15; 17], выполнялось их сравнение с фактическими деформациями усадки, полученными опытным путем.



**ИЧ** – индикатор часового типа; **2, 3** – репер стальной; **4** – стержень базы; **5, 6** – винт  
**Рисунок 1.** – Схема расположения индикаторов часового типа на керамзитобетонных призмах при измерении деформаций свободной усадки [1]

Для выполнения сравнительного анализа были рассчитаны значения относительных деформаций полной усадки керамзитобетона в момент времени  $t$  ( $t = 7 \dots 120$  сут) с учетом факторов, принятых согласно эмпирическим данным (таблица 3; рисунок 2).

**Таблица 3.** – Значения относительных деформаций полной усадки легкого бетона в момент времени  $t$  в соответствии с моделями [11–15; 17] и опытными данными

Метод определения относительных деформаций полной усадки	Относительные деформации полной усадки $\varepsilon_{cs}$ бетона в момент времени $t$ , %							
	7 сут	10 сут	20 сут	30 сут	42 сут	60 сут	91 сут	120 сут
Опытные данные для керамзитобетона	0,0193	0,0427	0,1022	0,1403	0,1822	0,2313	0,2848	0,2891
Модель Eurocode 2 [11]	0,1777	0,2431	0,4098	0,4966	0,5761	0,6532	0,7299	0,7720
Модель Н. Costa, Е. Júlio, J. Lourenço [12]	0,0884	0,1204	0,1963	0,2446	0,2835	0,3213	0,3589	0,3796
Модель СП.5.03.01 [13]	0,1825	0,2224	0,3243	0,3833	0,4448	0,5153	0,6022	0,6606
Модель ACI 209R [14]	0,1194	0,1669	0,2966	0,3696	0,4401	0,5120	0,5873	0,6303
Модель О.Б. Голишева, А.Н. Бамбуры [15]	0,0569	0,0799	0,1579	0,2149	0,2824	0,3677	0,4794	0,5537
Модель Е.М. Бабича [17]	0,1053	0,1400	0,2345	0,2874	0,3383	0,3901	0,4441	0,4749

На основании данных таблицы 3 и рисунка 2 можно сделать вывод, что рассмотренные выше модели завышают значения усадочных деформаций для керамзитобетона, особенно для раннего периода усадки (первые 7 сут). Это может быть связано с тем, что в первые сутки наблюдается увеличение объема керамзитобетона: керамзит сначала поглощает воду, а затем отдает ее обратно с течением времени. Данное утверждение хорошо согласуется с результатами, полученными в [20; 21].

Согласно моделям [11–14; 16; 18] рассчитаны предельные значения полной усадки легкого бетона  $\varepsilon_{cs,lim}$ , результаты расчета приведены в таблице 4. Нахождение  $\varepsilon_{cs,lim}$  по полученным экспериментальным данным для керамзитобетона было выполнено на основании методики, предложенной в [19].

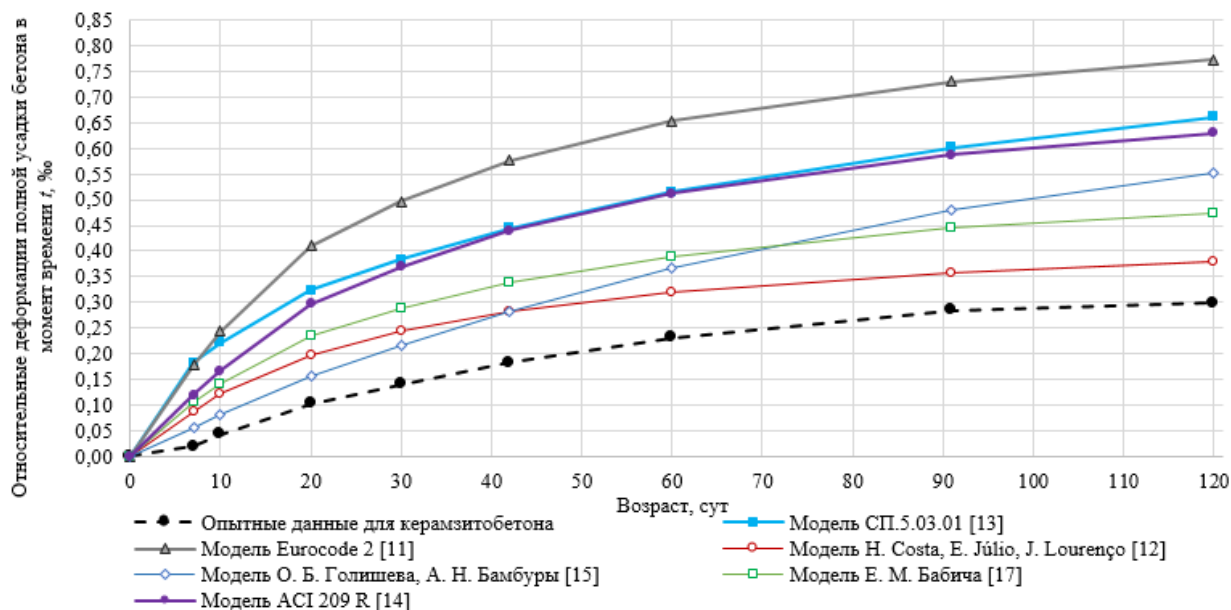


Рисунок 2. – Развитие относительных деформаций полной усадки бетона во времени

Таблица 4. – Значения предельных относительных деформаций полной усадки

Метод определения предельных относительных деформаций полной усадки	Предельные относительные деформации полной усадки $\varepsilon_{lcs,lim}$ , %	Отклонение расчетных значений от опытных, % $\frac{\varepsilon_{lcs,lim}^{расч.} - \varepsilon_{lcs,lim}^{опыт.}}{\varepsilon_{lcs,lim}^{опыт.}} \cdot 100\%$
Опытные данные для керамзитобетона согласно [19]	0,5620	–
Модель EN 1992-1-1 [11]	0,9401	67,27
Модель Модель Н. Costa, E. Júlio, J. Lourenço [12]	0,4576	–18,58
Модель СП.5.03.01 [13]	0,8348	48,54
Модель АСІ 209 R [14]	0,8157	45,15
Модель [16]	0,7440	32,38
Модель СП 63.13330.2018 [18]	0,2000	–64,41

Исходя из полученных данных в таблице 4, можно отметить превышение значений конечных усадочных деформаций по сравнению с эмпирическими результатам на 32–67 % для моделей [11; 13; 14; 16]. Модель [18] не гарантирует получение корректных результатов, т.к. предельные относительные деформации полной усадки керамзитобетона занижены более, чем в 2 раза. Можно отметить довольно схожие результаты модели [12] с опытными данными, полученными в рамках настоящего исследования, что может быть обусловлено введением эмпирического поправочного коэффициента  $\eta_3$  для легкого бетона, предложенного авторами [12].

**Заключение.** В соответствии с полученными результатами установлено, что расчетные значения усадочных деформаций, полученные при расчете по рассмотренным моделям, значительно превышают экспериментальные значения, особенно для раннего периода усадки (первые 7 сут). Применение представленных расчетных моделей для определения деформаций усадки керамзитобетона не гарантирует получение корректных расчетных значений. Это обуславливает проведение дополнительных исследований для уточнения модели по определению относительных деформаций полной усадки легкого бетона, изготовленного на основе местной сырьевой базы. Одним из вариантов усовершенствования расчетной модели можно рассматривать введение эмпирических поправочных коэффициентов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Семенюк, С.Д. Особенности определения стесненной усадки керамзитожелезобетона / С.Д. Семенюк, Ю.Г. Москалькова, В.А. Ржевувкая // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F. Стр.-во. Прикладные науки. – 2020. – № 8. – С. 58–65.
- Clarke, J.L. Structural lightweight aggregate concrete / J.L. Clarke. – Glasgow ; UK : Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, 2005. – 161 p.
- A comparison study of the mechanical properties and drying shrinkage of oil palm shell and expanded clay lightweight aggregate concretes / P. Shafiqh [et al.] // Materials & Design. – 2014. – Vol. 60. – P. 320–327. DOI: [10.1016/j.matdes.2014.04.001](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.001).
- Bremner, T.W. Lightweight concrete / T.W. Bremner // Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (Second Edition). – 2008. – P. 307–323. DOI: [10.1533/9781845694685.167](https://doi.org/10.1533/9781845694685.167).

5. Курятников, Ю.Ю. Вопросы разработки керамзитобетона для монолитного строительства / Ю.Ю. Курятников, Р.С. Кочетков // Вестн. Твер. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 3, № 3. – С. 15–20.
6. Гасанов, А.Б. Повышение прочности при растяжении конструкционного керамзитобетона / А.Б. Гасанов, А.Г. Вандоловский // Наук. вісн. буд-ва. – 2015. – № 2. – С. 162–166.
7. К вопросу о корреляции усадки и прочности бетонов / И.Н. Максимова [и др.] // Интернет-Вестн. ВолГАСУ. – 2015. – № 3. – С. 1–6.
8. Вальц, К. Усадочные деформации и напряжения бетона / К. Вальц // II Международный конгресс по бетону в Висбадене, Висбаден, 22–28 июня 1957 г. / пер. с нем. В.М. Рогинская; под ред. А.Н. Попова. – М.: Госстройиздат, 1960. – С. 55–60.
9. Younis, K.H. Restrained shrinkage behaviour of concrete with recycled materials: a thesis ... the degree of Doctor of Philosophy / K.H. Younis; University of Sheffield. – Sheffield, 2014. – 326 p.
10. Jeong, J. Variation of shrinkage strain within the depth of concrete beams / J. Jeong, Y. Park, Y. Lee // Materials. – 2015. – Vol. 8, iss. 11. – P. 7780–7794. DOI: [10.3390/ma8115421](https://doi.org/10.3390/ma8115421).
11. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings: EN 1992-1-1:2004. – Publ. date. 01.12.04. – Brussels: CEN, 2004. – 225 p.
12. Costa, H. New approach for shrinkage prediction of high-strength lightweight aggregate concrete / H. Costa, E. Júlio, J. Lourenço // Constructions and Buildings materials. – 2012. – Vol. 35. – P. 84–91. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2012.02.052](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.052).
13. Бетонные и железобетонные конструкции = Бетонныя і жалезабетонныя канструкцыі: СП 5.03.01-2020. – Введ. 16.11.20. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 236 с.
14. Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures: ACI 209 R-92. – Publ. date. 01.03.92. – Farmington Hills: American Concrete Institute, 1992. – 47 p.
15. Голишев, О.Б. Курс лекций з основ розрахунку конструкцій з опору залізобетону / О.Б. Голишев, А.Н. Бамбура. – Киев: Логос, 2004. – 340 с.
16. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР; под ред. Л.Г. Бальян. – М.: Стройиздат, 1988. – 121 с.
17. Бабич, Е.М. Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях / Е.М. Бабич. – Киев: Вища Школа, 1988. – 207 с.
18. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения: СП 63.13330.2018. – Введ. 20.06.19. – М.: М-во стр-ва и жилищно-коммунального хоз-ва Рос. Федерации, 2018. – 150 с.
19. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести: ГОСТ 24544-81. – Введ. 01.01.82 (с Изменением № 1). – М.: Госстандарт, 1980. – 26 с.
20. Bentur, A. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates / A. Bentur, Sh. Igarashi, K. Kovler // Cement and Concrete Research. – 2001. – Vol. 31. – P. 1587–1591. DOI: [10.1016/S0008-8846\(01\)00608-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00608-1).
21. Wendling, A. Creep and shrinkage of lightweight self-consolidating concrete for prestressed members / A. Wendling, K. Sadhasivam, R.W. Floyd // Construction Building Materials. – 2018. – Vol. 167. – P. 205–215. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2018.02.017](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.017).

Поступила 28.09.2021

## THE RELATIVE TOTAL SHRINKAGE STRAIN OF EXPANDED CLAY CONCRETE

V. RZHEVUTSKAYA, Y. MASKALKOVA

*The article provides a comparative analysis of the existing design models for determining the shrinkage strain of lightweight concrete. The factors for calculation shrinkage strain of lightweight concrete for the presented models are considered. The object of research is expanded clay concrete based on expanded clay gravel. The subject of research is the unrestrained shrinkage strain of expanded clay concrete. The results of experimental studies of the relative strain of the total shrinkage of expanded clay concrete are presented. A comparison of the experimental values of the shrinkage strain of expanded clay concrete with the calculated values obtained according to the considered models proposed by other researchers, and given in national and foreign standards is carried out. In accordance with the obtained results, it was found that the values of shrinkage strain obtained in the calculation according to the considered models significantly exceed the experimental values, especially for the early period of shrinkage (the first 7 days). The use of the presented design models to determine the shrinkage strain of expanded clay concrete does not guarantee that the correct calculated values will be obtained, and it necessitates additional studies to improve the design models.*

**Keywords:** shrinkage, unrestrained shrinkage, shrinkage strain, volumetric strain, lightweight concrete, expanded clay concrete.