

УДК 691.328.32

DOI 10.52928/2070-1683-2023-34-2-47-54

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАСЧЕТУ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ
ПОЛНОЙ УСАДКИ КЕРАМЗИТОБЕТОНАВ.А. РЖЕВУЦКАЯ¹⁾, канд. техн. наук, доц. Ю.Г. МОСКАЛЬКОВА²⁾^(1, 2) Белорусско-Российский университет, Могилев)¹⁾ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8854-5408>, ²⁾<https://orcid.org/0000-0002-4107-2452>

В статье выполнен аналитический обзор исследований, посвященных развитию усадочных деформаций керамзитобетонов, на основании которого установлено, что значимым фактором является местная сырьевая база, а значит для каждого региона актуально накопление экспериментальных данных и корректировка расчетных моделей для аналитического определения деформаций полной усадки. В связи с этим задачей исследования являлась разработка предложений по расчету относительных деформаций полной усадки керамзитобетона, изготовленного на основе местной сырьевой базы. По результатам проведенного исследования на основе положений СП 5.03.01 и Eurocode 2 разработана усовершенствованная модель аналитического определения значений относительных деформаций полной усадки конструкционного керамзитобетона. В предложенной модели в расчет введено значение активности цемента как определяющего фактора прочности цементного камня, а также учитываются водоцементное отношение и объем крупного заполнителя в бетонной смеси. Предлагаемая расчетная модель с достаточной точностью позволяет определить величину относительной деформации полной усадки керамзитобетона в возрасте от 28 до 120 сут.

Ключевые слова: усадка, свободная усадка, усадочные деформации, керамзит, легкий бетон, керамзитобетон, расчетная модель.

Введение. Правильная оценка деформаций усадки конструкции имеет важное значение ввиду неизбежного развития усадочных напряжений в бетоне, которые приводят к образованию усадочных трещин [1–5].

В настоящее время опытные данные по развитию усадочных деформаций керамзитобетона, полученные исследователями разных стран [6], довольно противоречивы: некоторые исследователи отмечают, что легкие бетоны на основе керамзита подвержены большим усадочным деформациям, чем бетоны на плотных заполнителях [7; 8], в то время как другие исследователи эмпирически доказывают обратное [9; 10], т.е. что усадочные деформации бетонов на легких пористых заполнителях меньше по абсолютному значению по сравнению с усадочными деформациями бетонов аналогичных составов на плотных заполнителях.

Таким образом, многочисленные исследования по данному вопросу демонстрируют, что опытные значения деформаций усадки легких бетонов находятся в широком диапазоне. Эту особенность можно объяснить специфическими свойствами легких заполнителей, в том числе керамзитовых, изготавливаемых в разных регионах страны, т.е. сырьевая база имеет определяющее значение. Поэтому получение опытных данных, отражающих особенности развития усадочных деформаций керамзитобетона, является актуальным для каждого конкретного региона.

В [11] установлено, что расчетные значения относительных деформаций усадки согласно моделям Eurocode 2¹, N. Costa, E. Júlio и J. Lourenço [12], СП 5.03.01², ACI 209 R³, О.Б. Голишева и А.Н. Бамбуры [13], Е.М. Бабича [14], а также⁴ значительно превышают полученные нами экспериментальные данные [6]. Таким образом, представляется перспективной разработка усовершенствованной расчетной модели для определения усадочных деформаций керамзитобетона, изготовленного на основе белорусской сырьевой базы. Для изготовления опытных образцов был взят керамзитовый гравий производства ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль» как наиболее распространенный и общедоступный легкий заполнитель в Республике Беларусь.

Объектом исследования являются керамзитобетонные образцы в виде призм. Предмет исследования – полные деформации свободной усадки керамзитобетона. Задача исследования – предложения по расчету относительных деформаций полной усадки керамзитобетона, изготовленного на основе местной сырьевой базы.

Теоретические предпосылки аналитического определения относительных деформаций полной усадки керамзитобетона. Строительные правила СП 5.03.01 позволяют определить значение относительной деформации полной усадки бетона $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ в момент времени t :

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cbs}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s), \quad (1)$$

¹ Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings: EN 1992-1-1-2004. – Brussels: CEN, 2004. – 225 p.

² СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 236 с.

³ ACI 209 R-92. Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures. – Farmington Hills: American Concrete Institute, 1992. – 47 p.

⁴ Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 121 с.

где $\varepsilon_{cbs}(t)$ – относительная деформация базовой усадки бетона, ‰, учитывающая среднюю прочность бетона на осевое сжатие, вид и класс по прочности цемента на сжатие;

$\varepsilon_{cbs}(t, t_s)$ – относительная деформация усадки высыхания бетона, ‰, зависящая от средней прочности бетона на осевое сжатие, вида и класса по прочности цемента на сжатие, влажности окружающей среды, приведенного размера элемента;

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

Действующими ТНПА⁵ предусмотрен расчет относительных деформаций усадки легкого бетона $\varepsilon_{lcs}(t, t_s)$ путем умножения расчетного значения деформаций $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$, полученного по формуле (1), на коэффициент η , зависящий от класса легкого бетона по прочности на сжатие (таблица 1).

Таблица 1. – Значения коэффициента η в соответствии с СП 5.03.01

Класс бетона по прочности на сжатие	Значение коэффициента η
LC 8/9, LC 12/13, LC 16/18	1,5
LC 20/22 и выше	1,2

Авторы Н. Costa, E. Júlio, J. Lourenço [12] при определении значения модифицированной относительной деформации базовой усадки $\varepsilon_{cbs}(f_{cm})$ предложили заменить среднюю прочность легкого бетона на осевое сжатие f_{cm} на прочность цементной пасты $f_{c,b}$ с целью последующего расчета относительной деформации базовой усадки $\varepsilon_{cbs}(t, t_s)$. Поскольку усадка бетона на портландцементе происходит в основном за счет усадки цементного камня, что отмечается также в [15], то предложенная в [12] замена f_{cm} на $f_{c,b}$ представляется целесообразной.

За основу исследователи [12] приняли расчетную модель Eurocode 2 и предложили следующую формулу для расчета поправочного коэффициента η :

$$\eta = C_{B/C} / C_{ca}, \quad (2)$$

здесь

$$C_{B/C} = 1,7 \cdot (B / C)^{0,8}, \quad (3)$$

$$C_{ca} = \prod_{i=1}^n \left(1 - \frac{V_{ca,i}}{100} \cdot 0,13 \cdot 0,25^{15 \rho_{0,ca,i}} \right), \quad (4)$$

где B/C – водоцементное отношение;

n – количество разных видов крупного заполнителя при проведении испытания;

$V_{ca,i}$ – объем i -го крупного заполнителя в бетонной смеси, дм^3 ;

$\rho_{0,ca,i}$ – истинная плотность i -го крупного заполнителя, $\text{кг}/\text{дм}^3$.

В соответствии с рекомендациями [12] нами было принято решение в расчетной модели СП 5.03.01 заменить среднюю прочность легкого бетона на осевое сжатие f_{cm} активностью цемента $f_{c,b}$.

Кроме того, на основе полученных эмпирических данных для керамзитобетона была предложена скорректированная формула для расчета поправочного коэффициента η :

$$\eta = k_{B/C} / k_{ca}, \quad (5)$$

здесь

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

$$k_{ca} = \frac{V_{ca,1}}{V_{ca}}, \quad (7)$$

где B/C – водоцементное отношение;

V_{ca} – объем крупного заполнителя в бетонной смеси, м^3 ;

$V_{ca,1}$ – единичный объем крупного заполнителя в бетонной смеси, $V_{ca,1} = 1 \text{ м}^3$.

Таким образом, в расчете поправочного коэффициента η по скорректированной формуле (5) учитываются водоцементное отношение и объем крупного заполнителя в бетонной смеси.

Основные материалы и состав керамзитобетонной смеси для изготовления опытных образцов. При приготовлении керамзитобетонной смеси для изготовления опытных образцов были использованы следующие материалы:

- гравий керамзитовый производства ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукмль»;

⁵ См. сноску 2.

- портландцемент производства ОАО «Белорусский цементный завод»;
- песок речной;
- вода.

Основные характеристические показатели используемых заполнителей и вяжущего (керамзитового гравия, песка и цемента) приведены в таблицах 2–4.

Таблица 2. – Основные характеристики керамзитового гравия

Наименование показателя	Величина	
Фракция	4–10 мм	
Прочность	1,03 МПа	
Истинная плотность	2,35 г/см ³	
Средняя плотность зерна керамзита	0,80 г/см ³	
Насыпная плотность	390 кг/м ³	
Общая пористость	83%	
Водопоглощение по массе	16,70%	
Водопоглощение по объему	13,40%	

Таблица 3. – Основные характеристики песка

Наименование показателя	Величина
Модуль крупности	2,13
Истинная плотность	2,46 г/см ³
Средняя плотность	1,67 г/см ³
Насыпная плотность	1670 кг/м ³
Общая пористость	32,32%
Количество пылевидных и глинистых частиц	1,08%

Таблица 4. – Основные характеристики портландцемента

Наименование показателя	Величина
Истинная плотность	3,05 г/см ³
Средняя плотность	1,14 г/см ³
Насыпная плотность	1140 кг/м ³
Нормальная густота	27%
Активность	42,5 МПа
Распływ	106 мм
Тонкость помола	8%

Наиболее эффективный состав керамзитобетонной смеси был подобран в Серии № 1, а исследования по развитию усадочных деформаций были реализованы в Сериях № 2–4.

Согласно проведенным испытаниям по подбору оптимального состава бетонной смеси принят следующий состав для изготовления образцов в Сериях № 2–4: Ц : П : К = 1 : 1,84 : 0,79 при В/Ц = 0,52. Основные результаты испытаний прочностных характеристик керамзитобетона приведены в таблице 5 согласно [16].

Таблица 5. – Характеристики опытных керамзитобетонных образцов-цилиндров [16]

Номер серии	Средняя плотность, кг/м ³	Цилиндрическая прочность $f_{ic, cyl}$, МПа		
		Среднее значение f_{icm}	Коэффициент вариации $V, \%$	Характеристическое значение f_{ick}
Серия № 2	1387	11,62	5,10	10,50
Серия № 3	1536	11,76	5,41	10,56
Серия № 4	1475	11,45	4,84	10,44

Методика и результаты проводимых исследований развития деформаций усадки керамзитобетона.

Фиксирование развития деформаций усадки осуществлялось на керамзитобетонных образцах в виде призм с размерами 150 × 150 × 600 мм при помощи индикаторов часового типа, установленных на каждой стороне опытного образца [11]. Последовательно были испытаны три серии опытных образцов-призм (Серии № 2–4). В каждой серии было изготовлено по 3 образца-близнеца. На открытой грани каждого опытного образца индикаторы были установлены через три часа после бетонирования, что позволило зафиксировать деформации усадки, начиная с 1 суток. На остальных гранях призм дублирующие индикаторы были установлены на 3 суток после бетонирования (сразу после распалубки образцов). Наблюдение за развитием относительных деформаций полной усадки керамзитобетона осуществлялось в течение 120 сут (рисунки 1, 2).

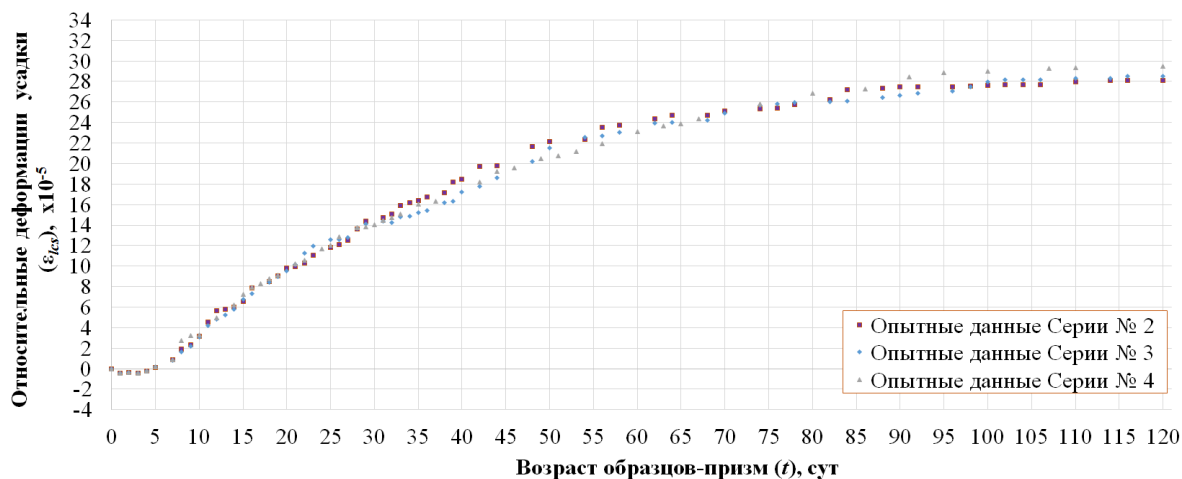


Рисунок 1. – Развитие относительных деформаций полной усадки керамзитобетона во времени

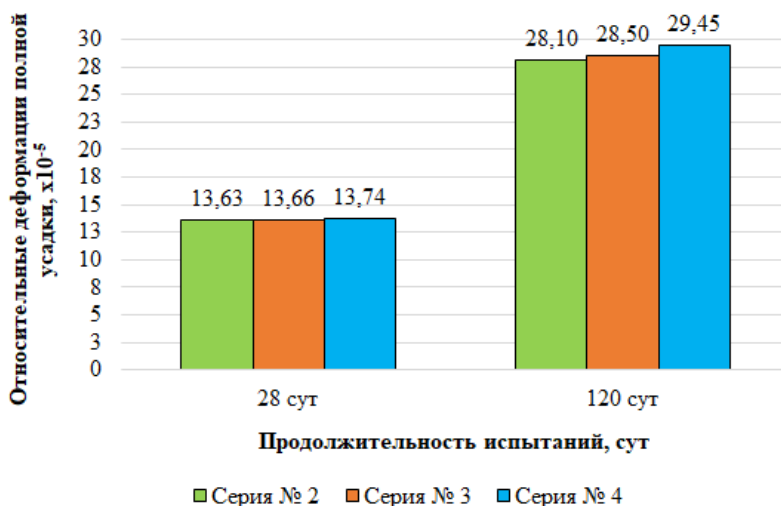


Рисунок 2. – Величина относительных деформаций полной усадки керамзитобетона на 28 и 120 сут

Результаты расчета по предлагаемой усовершенствованной модели определения относительных деформаций полной усадки. В соответствии с предложенной усовершенствованной моделью входные параметры для расчета относительных деформаций полной усадки легкого бетона $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ приведены в таблице 6.

Таблица 6. – Входные параметры для определения относительных деформаций полной усадки по предлагаемой усовершенствованной модели

Наименование показателя	Показатель
Размеры поперечного сечения образца-призмы	150 × 150 мм
Вид и класс цемента	нормально твердеющий портландцемент
Активность цемента	42,5 МПа
Объем керамзитового гравия на 1 м ³	0,867 м ³
Водоцементное отношение	0,52
Относительная влажность воздуха	55%
Возраст бетона к моменту начала воздушно-сухого хранения	1 сут

Величины коэффициентов $k_{в/ц}$, $k_{са}$ и η , рассчитанные по формулам (5)–(7), приведены в таблице 7.

Таблица 7. – Величина поправочного коэффициента η по усовершенствованной модели

Наименование показателя	Величина
Коэффициент $k_{в/ц}$, учитывающий водоцементное отношение	1,008
Коэффициент $k_{са}$, учитывающий объемное содержание крупного заполнителя в бетонной смеси	0,867
Поправочный коэффициент η	1,162

Сравнение значений поправочных коэффициентов η , рассчитанных согласно предлагаемой усовершенствованной модели и моделям СП 5.03.01 и [12], приведено в таблице 8.

Таблица 8. – Сравнение величин поправочного коэффициента η

Модель	Величина поправочного коэффициента η	Отклонение $\frac{\eta - \eta_{\text{предл}}}{\eta_{\text{предл}}} \cdot 100\%$
Предлагаемая усовершенствованная модель	1,162	–
Модель СП 5.03.01 (для класса легкого бетона ниже LC 20/22)	1,5	29%
Модель Н. Costa, Е. Júlio, J. Lourenço	1,008	-13%

Результаты расчета относительных деформаций полной усадки легкого бетона по предлагаемой расчетной модели и их сравнение с эмпирическими данными для керамзитобетона приведены в таблице 9.

Таблица 9. – Отклонение расчетных от опытных значений относительных деформаций полной усадки керамзитобетона

Возраст, сут	Средние относительные деформации полной усадки керамзитобетона по Сериям № 2–4:		Отклонение $\left \frac{\varepsilon_{lcs,cal} - \varepsilon_{lcs,m,exp}}{\varepsilon_{lcs,cal}} \right \cdot 100\%$
	опытные данные, $\varepsilon_{lcs,m,exp}$, ‰	рассчитанные по предлагаемой модели, $\varepsilon_{lcs,cal}$, ‰	
28	0,1368	0,1603	14,7%
31	0,1451	0,1685	13,9%
42	0,1857	0,1950	4,7%
62	0,2398	0,2325	3,1%
91	0,2760	0,2724	1,3%
120	0,2868	0,3021	5,1%

Согласно СН 2.01.01⁶ проведена оценка корректности применения предлагаемой усовершенствованной модели для определения величины относительных деформаций полной усадки керамзитобетона (таблица 10).

Таблица 10. – Оценка коэффициента вариации вектора ошибок усовершенствованной модели

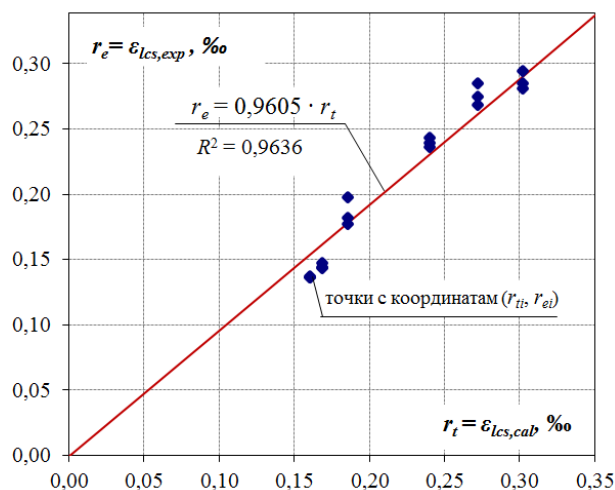
Маркировка образцов	$r_e = \varepsilon_{lcs,exp}$, ‰	$r_t = \varepsilon_{lcs,cal}$, ‰	$r_e \cdot r_t$	r_t^2	Ошибка δ_i	Логарифм Δ_i	$(\bar{\Delta} - \Delta_i)$
1	2	3	4	5	6	7	8
КБ-2-28	0,1363	0,1603	0,0218	0,0257	0,885	-0,1227	0,010147
КБ-3-28	0,1366	0,1603	0,0219	0,0257	0,887	-0,1204	0,009697
КБ-4-28	0,1374	0,1603	0,0220	0,0257	0,892	-0,1146	0,008579
КБ-2-31	0,1474	0,1685	0,0248	0,0284	0,910	-0,0948	0,005307
КБ-3-31	0,1435	0,1685	0,0242	0,0284	0,886	-0,1212	0,009847
КБ-4-31	0,1443	0,1685	0,0243	0,0284	0,891	-0,1156	0,008773
КБ-2-42	0,1974	0,1857	0,0330	0,0345	0,995	-0,0051	0,000285
КБ-3-42	0,1776	0,1857	0,0338	0,0345	1,021	0,0204	0,001790
КБ-4-42	0,1822	0,1857	0,0338	0,0345	1,021	0,0204	0,001790
КБ-2-62	0,2433	0,2398	0,0583	0,0575	1,056	0,0542	0,005796
КБ-3-62	0,2395	0,2398	0,0574	0,0575	1,039	0,0383	0,003626
КБ-4-62	0,2366	0,2398	0,0567	0,0575	1,026	0,0260	0,002298
КБ-2-91	0,2747	0,2724	0,0748	0,0742	1,049	0,0480	0,004893
КБ-3-91	0,2684	0,2724	0,0731	0,0742	1,025	0,0248	0,002180
КБ-4-91	0,2848	0,2724	0,0776	0,0742	1,087	0,0838	0,011185
КБ-2-120	0,2810	0,3021	0,0849	0,0913	0,968	-0,0328	0,000118
КБ-3-120	0,2850	0,3021	0,0861	0,0913	0,981	-0,0188	0,000010

⁶ СН 2.01.01–2022. Основы проектирования строительных конструкций. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 65 с.

Окончание таблицы 10

1	2	3	4	5	6	7	8
КБ-4-120	0,2945	0,3021	0,0890	0,0913	1,014	0,0140	0,001290
Среднее значение экспериментальных результатов						$r_{em} = 0,2117$	
Среднее значение результатов расчета						$r_{im} = 0,2314$	
Уклон, определяемый по методу наименьших квадратов						$b = 0,9605$	
Значение ошибки для экспериментальных значений						$\delta_m = 0,9803$	
Оценочное значение $E(\Delta)$						$\bar{\Delta} = -0,0223$	
Выборочная дисперсия вектора Δ						$s_{\Delta}^2 = 0,0052$	
Коэффициент вариации для вектора ошибок δ						$V_{\delta} = 0,0719$	
Среднее значение теоретической функции сопротивления, рассчитанное с использованием средних значений базисных переменных						$r_m = 0,2179$	
Отклонение среднего значения теоретической функции r_m от среднего значения экспериментальных результатов r_{em} , %						$\% \Delta_{rm} = -2,9194$	

Сравнение экспериментальных r_e и теоретических r_t значений представлено на рисунке 3.

Рисунок 3. – Диаграмма « $r_e - r_t$ »

На диаграмме « $r_e - r_t$ » (r_e – экспериментальные данные, r_t – расчетные результаты) все точки расположены близко к прямой $r_e = b \cdot r_t$, угол наклона прямой составляет примерно 45° ($\arctan b = \arctan 0,9605 = 43,84^\circ$), коэффициент вариации для вектора ошибок не превышает 10% ($V_{\delta} = 7,19\% < 10\%$), а коэффициент детерминации R^2 – не ниже 0,9 ($R^2 = 0,9636$). Следовательно, предлагаемую расчетную модель можно считать достаточно точной.

Заключение. На основании эмпирических данных предложена усовершенствованная модель аналитического определения значений относительных деформаций полной усадки конструкционного керамзитобетона (с прочностью на осевое кратковременное сжатие не менее 12 МПа), изготовленного на основе керамзитового гравия с максимальной крупностью зерен 10 мм производства ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукомль». Модель основывается на положениях СП 5.03.01 и Eurocode 2. В усовершенствованной модели предложено выполнять расчет с использованием активности цемента $f_{c,b}$ взамен средней прочности легкого бетона на осевое сжатие f_{cm} , так как усадка бетона в большей степени обусловлена усадочными деформациями цементного камня. Кроме того, корректирующий коэффициент η является расчетным и учитывает такие характеристики бетонной смеси, как водоцементное отношение и объем крупного заполнителя в бетонной смеси. Предлагаемая усовершенствованная модель с достаточной точностью позволяет спрогнозировать величину относительной деформации полной усадки керамзитобетона в возрасте от 28 до 120 сут.

ЛИТЕРАТУРА

1. Расчет на входные и формальные деформации бетона в естественных условиях сухого жаркого климата / Б. Ризаев, И. Ахмедов, А. Хамидов и др. // J. of new century innovations. – 2022. – Т. 19, № 6. – С. 183–193.
2. Работа монолитного железобетонного ребристого перекрытия при наличии припорных усадочных трещин в ребрах / А.А. Цветкова, С.А. Агафонов, А.О. Горячева и др. // Инженерные исследования. – 2023. – Т. 11, № 1. – С. 11–19.
3. Учет ползучести и усадки бетона по СП 5.03.01-2020 при расчете железобетонных конструкций на основе деформационной расчетной модели / Д.Н. Лазовский, В.В. Тур, Д.О. Глухов и др. // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. – 2021. – № 2 (125). – С. 7–12. DOI: 10.36773/1818-1212-2021-125-2-7-12.

4. Bazant Z.P. Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future // *Nuclear Engineering and Design*. – 2001. – Vol. 203, iss. 1. – P. 27–38. DOI: 10.1016/S0029-5493(00)00299-5.
5. Clarke J.L. *Structural lightweight aggregate concrete*. – Glasgow; UK: Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, 2005. – 161 p.
6. Raupov Ch., Malikov G., Zokirov J. Determination of the boundary of the linear creep of expanded clay concrete during compression // *Science and Innovation*. – 2022. – № 4. – P. 301–306. DOI: 10.5281/zenodo.6981518.
7. Bremner T.W. *Lightweight concrete // Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (Second Edition)*. – 2008. – P. 307–323.
8. Effect of clay content on shrinkage of cementitious materials / H. Zhao, Yu. Ma, J. Zhang et al. // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 322. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125959.
9. Кравченко С.А., Постернак А.А. Экспериментальное исследование усадки, ползучести и потерь напряжения в арматуре элементов из керамзитобетона на многокомпонентном вяжущем // *Вісн. Одеської держ. акад. буд-ва та архітектури*. – 2014. – № 56. – С. 124–128.
10. Курятников Ю.Ю., Кочетков Р.С. Вопросы разработки керамзитобетона для монолитного строительства // *Вестн. Тверского гос. техн. ун-та*. – 2019. – Т. 3, № 3. – С. 15–20.
11. Ржевуцкая В.А., Москалькова Ю.Г. Относительные деформации полной усадки керамзитобетона // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр-во. Прикладные науки*. – 2021. – № 16. – С. 99–105.
12. Costa H., Júlio E., Lourenço J. New approach for shrinkage prediction of high-strength lightweight aggregate concrete // *Constructions and Buildings materials*. – 2012. – Vol. 35. – P. 84–91. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.052.
13. Голишев О.Б., Бамбура А.Н. Курс лекций з основ розрахунку конструкцій з опору залізобетону. – Киев: Логос, 2004. – 340 с.
14. Бабич Е.М. Конструкции из легких бетонов на пористых заполнителях. – Киев: Вища школа, 1988. – 207 с.
15. Анализ влияния сухого жаркого климата на работу железобетонных элементов / И. Ахмедов, Б. Ризаев, А. Хамидов и др. // *J. of new century innovations*. – 2022. – Т. 19, № 6. – С. 39–48.
16. Maskalkova Yu.G., Rzhhevutskaya V.A. Compressive cylinder strength and deformability of expanded clay fiber-reinforced concrete with polypropylene fiber // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2022. – Vol. 18, iss. 2. – P. 31–42. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-31-42.

REFERENCES

1. Rizaev, B., Akhmedov, I., Khamidov, A., Kholmiraev, S., Zhalalov, Z. & Umarov, I. (2022). Raschet na vkhodnye i formal'nye deformatsii betona v estestvennykh usloviyakh sukhogo zharkogo klimata. *J. of new century innovations*, 19(6), 183–193. (In Russ.).
2. Tsvetkova, A.A., Agafonov, S.A., Goryacheva, A.O. & Maslak, T.V. (2023). Rabota monolitnogo zhelezobetonno rebristogo perekrytiya pri nalichii priopornykh usadochnykh treshchin v rebrakh [The performance of a monolithic reinforced concrete ribbed floor with shrinkage cracks in the ribs]. *Inzhenernye issledovaniya [Engineering Research]*, 11(1), 11–19. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Lazovskii, D.N., Tur, V.V., Glukhov, D.O. & Lazovskii, E.D. (2021). Uchet polzuchesti i usadki betona po SP 5.03.01-2020 pri raschete zhelezobetonnykh konstrukttsii na osnove deformatsionnoi raschetnoi modeli [Creep and shrinking of concrete accounting according to SP 5.03.01-2020 when analysis of reinforced concrete structures based on deformational analytical model]. *Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta [Vestnik of Brest State Technical University]*, 125(2), 7–12. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.36773/1818-1212-2021-125-2-7-12.
4. Bazant, Z.P. (2001). Prediction of concrete creep and shrinkage: past, present and future. *Nuclear Engineering and Design*, 203(1), 27–38. DOI: 10.1016/S0029-5493(00)00299-5.
5. Clarke, J.L. (2005). *Structural lightweight aggregate concrete*. Glasgow: Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall.
6. Raupov, Ch., Malikov, G. & Zokirov, J. (2022). Determination of the boundary of the linear creep of expanded clay concrete during compression. *Science and Innovation*, (4), 301–306. DOI: 10.5281/zenodo.6981518.
7. Bremner, T.W. (2008). *Lightweight concrete. Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (Second Edition)*, 307–323.
8. Zhao, H., Ma, Yu., Zhang, J., Hu, Zh., Li, H., Wang, Yu. ... Wang, K. (2022). Effect of clay content on shrinkage of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 322. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125959.
9. Kravchenko, S.A. & Posternak, A.A. (2014). Eksperimental'noe issledovanie usadki, polzuchesti i poter' napryazheniya v armature elementov iz keramzitobetona na mnogokomponentnom vyazhushchem. *Visn. Odes'koi derzh. akad. bud-va ta arkhitekturi*, (56), 124–128. (In Russ.).
10. Kuryatnikov, Yu.Yu. & Kochetkov, R.S. (2019). Voprosy razrabotki keramzitobetona dlya monolitnogo stroitel'stva [The development of concrete for monolithic construction]. *Vestn. Tverskogo gos. tekhn. un-ta [Vestnik of Tver state technical university]*, 3(3), 15–20. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Rzhhevutskaya, V.A. & Moskal'kova, Yu.G. (2021). Otnositel'nye deformatsii polnoi usadki keramzitobetona [The relative total shrinkage strain of expanded clay concrete]. *Vestn. Polotsk. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Constructions. Applied Sciences]*, (16), 99–105. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Costa, H., Júlio, E. & Lourenço, J. (2012). New approach for shrinkage prediction of high-strength lightweight aggregate concrete. *Constructions and Buildings materials*, 35, 84–91. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.052.
13. Golishev, O.B. & Bambura, A.N. (2004). *Kurs lekttsii z osnov rozrakhunku konstrukttsii z oporu zalizobetonu*. Kyiv: Logos. (In Russ.).
14. Babich, E.M. (1998). *Konstrukttsii iz legkikh betonov na poristykh zapolnitelyakh*. Kyiv: Vishcha shkola. (In Russ.).
15. Akhmedov, I., Rizaev, B., Khamidov, A., Kholmiraev, S., Umarov, I. & Khakimov, S. (2022). Analiz vliyaniya sukhogo zharkogo klimata na rabotu zhelezobetonnykh elementov. *J. of new century innovations*, 19(6), 39–48. (In Russ.).
16. Maskalkova, Yu.G. & Rzhhevutskaya, V.A. (2022). Compressive cylinder strength and deformability of expanded clay fiber-reinforced concrete with polypropylene. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 18(2), 31–42. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-2-31-42.

**SUGGESTIONS FOR CALCULATION OF RELATIVE STRAIN
OF THE TOTAL SHRINKAGE OF EXPANDED CLAY CONCRETE**

V. RZHEVUTSKAYA, Yu. MASKALKOVA
(Belarusian-Russian University, Mogilev)

The article provides an analytical review of studies on the shrinkage strain development of expanded clay concrete, based on which it was established that a significant factor is the local raw material base. It means that for each region it is important to accumulate experimental data and correct design models for the analytical determination of the total shrinkage strain. In this regard, the task of the study was to develop suggestions for calculating the relative strain of the total shrinkage of expanded clay concrete, made on the basis of the local raw material base. Predicated on the results of the study and according to the provisions of SP 5.03.01 and Eurocode 2, the improved model for the analytical determination of the values of relative strain of the total shrinkage of structural expanded clay concrete was developed. The proposed model takes into account the value of cement activity as a determining factor of the cement stone strength, and it takes into account the water-cement ratio and the coarse aggregate volume. The proposed design model makes it possible to determine with sufficient accuracy the value of the relative strain of the total shrinkage of expanded clay concrete at the age of 28 to 120 days.

Keywords: *shrinkage, free shrinkage, shrinkage strain, expanded clay aggregate, lightweight aggregate concrete, expanded clay concrete, design model.*