
Аналитическое определение термических и радиационных деформаций бетонов и растворов с низким содержанием заполнителей

А.В. Денисов

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Проведена экспериментальная проверка существующего метода аналитического определения радиационных и термических деформаций бетонов и растворов на основании данных о деформациях заполнителя и цементного камня для материалов с низким содержанием заполнителей. Проверка проведена на образцах растворов с различным содержанием заполнителя-песка по результатам определения изменений размеров после нагревания при температурах от 105 °С до 400 °С. Показано, что при объемном содержании заполнителей менее 52% наблюдаются различия между расчетными и экспериментальными значениями изменения размеров растворов после нагревания. Причем различия увеличиваются с уменьшением объемного содержания заполнителя, с ростом температуры нагревания и разницы между термическими деформациями заполнителя и цементного камня. Полученные результаты позволяют корректировать результаты расчетов с использованием указанного существующего аналитического метода для бетонов и растворов с содержанием заполнителей менее 52% при воздействии нагревания и радиации.

Ключевые слова: термические и радиационные деформации, растворы и бетоны, аналитическое и экспериментальное определение, содержание заполнителей, микроструктурные напряжения, растрескивание

Введение

Термические и радиационные деформации бетонов и растворов (расширение при нагревании и под действием радиации, усадка после нагревания) могут быть рассчитаны на основании данных о термических и радиационных деформациях заполнителей и цементного камня. Для этого имеется метод аналитического определения радиационных, термических и радиационно-термических деформаций бетонов и их составляющих, описанный в работах [1 - 4]. Этот метод, наряду с другими используемыми в тепловой и атомной энергетике методами [5, 6], получили широкое применение для определения и расчетно-аналитических исследований радиационных и термических изменений бетонов [7 - 9].

Вместе с тем при разработке указанного метода и описании деформаций используемых при этом моделей бетонов и растворов,

показанных на рис. 1, считали, что напряжения в структуре бетонов и растворов (микроструктурные напряжения) при термических и радиационных деформациях не значимы, и их можно не учитывать. Эти напряжения, вызванные разностью деформаций заполнителей и цементного камня (расширения или отсутствия у заполнителей и усадка у цементного камня), теоретически без учета растрескивания очень велики и поэтому фактически релаксируют в результате трещинообразования цементного камня. Это достаточно обосновано и доказано экспериментально при относительно большом объемном содержании заполнителей в бетонах и растворах, когда прослойки из цементного камня между заполнителями d очень тонкие, поэтому не могут выдержать эти микроструктурные напряжения без интенсивного растрескивания, вызывающего значительную релаксацию напряжений до малозначимых величин.

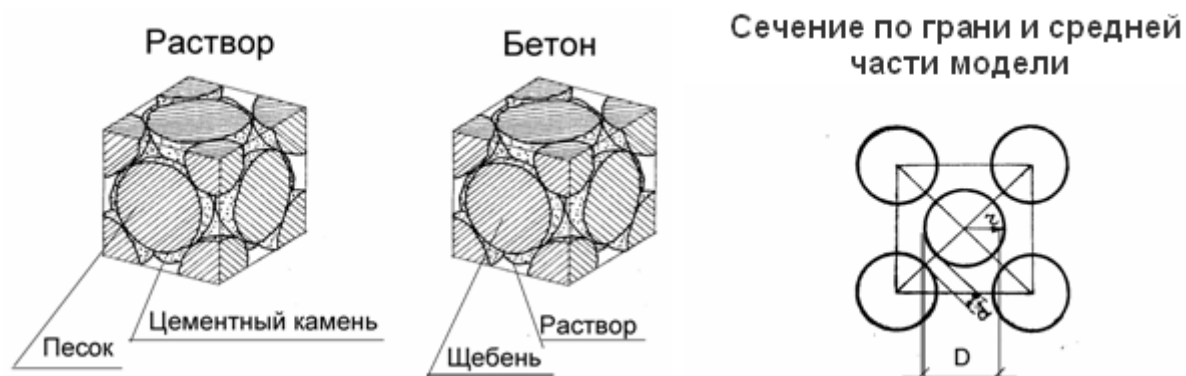


Рис. 1. Модель бетона и раствора в виде шаровидных зерен заполнителя одинакового диаметра, расположенных в кубической гранецентрированной решетке, окруженных матрицей из раствора и цементного камня соответственно, используемая при разработке метода аналитического определения радиационных и термических деформаций бетонов [1-4]

Однако в случаях, когда содержание заполнителей будет существенно ниже типичной для бетонов и растворов, то возможна другая ситуация. Прослойки между зернами заполнителей в этих случаях будут значительно больше по толщине, а напряжения в них ниже. При этом более толстые прослойки с меньшими напряжениями могут выдержать эти напряжения без растрескивания или подвергаться меньшему растрескиванию. Тогда

реальные микроструктурные напряжения могут быть значительно выше, чем после их релаксации в материалах с высоким содержанием заполнителей, и поэтому значимо влиять на их деформации. Однако экспериментальной проверки этого не проводили.

В связи с этим экспериментальная проверка существующего метода аналитического определения радиационных и термических деформаций бетонов и растворов с низким содержанием заполнителей является актуальной.

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка и при необходимости корректировка метода аналитического определения радиационных и термических деформаций бетонов и растворов, а также используемых в нем моделей при низком содержании заполнителей.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Выбрать для исследования материалы, вид и условия воздействия на эти материалы.
2. Экспериментально определить деформации исследуемых материалов после выбранного воздействия.
3. Рассчитать деформации материалов после выбранного воздействия на основании существующего аналитического метода.
4. Выполнить сравнение расчетных и экспериментальных деформаций исследованных материалов, провести при необходимости корректировку аналитического метода и используемых в нем моделей бетонов и растворов.

Методика исследования

Для исследований были выбраны растворы на кварцевом песке. Выбор раствора связан, с тем, что материал с небольшим содержанием заполнителя проще получить в виде раствора и более вероятно их использование. Выбор в

качестве заполнителя кварцевого песка объясняется достаточно большой стабильностью и изученностью свойств кварца.

В качестве вяжущего при изготовлении растворов использовали портландцемент Вольского завода сульфатостойкий, как отличающийся меньшей величиной экзотермии при твердении, для уменьшения искажения данных вследствие экзотермии. Основные характеристики портландцемента: активность – 377 кг/см^2 , удельная поверхность – $2730 \text{ см}^2/\text{г}$, нормальная густота 25%, плотность истинная 3175 кг/м^3 .

Использовали кварцевый песок с истинной плотностью $\gamma_{н.и.} = 2650 \text{ кг/м}^3$, с модулем крупности $M_k=2,1$ со средним размером частиц $0,59 \text{ мм}$. Насыпная плотность песка в уплотненном состоянии - $\gamma_{н.н.у.} = 1800 \text{ кг/м}^3$.

Для исследования были приняты составы растворов с отношением массы цемента к массе песка: 1:0,3; 1:1; 1:3, что позволило получить растворы с относительным объемным содержанием заполнителя 0,16, 0,37 и 0,52 (16%, 37%, 52%), а также цементный камень без заполнителя с В/Ц=0,25; 0,30 и 0,35 для определения усадки чистого цементного камня и использования ее в расчетах. Технологические составы исследованных растворов и цементного камня приведены в таблице 1. Истинное В/Ц определяли исходя из водопотребности песка 8% по массе.

Таблица 1.

Технологические составы исследованных растворов

Шифр состава	Ц:П	Расход цемента Ц, кг/м^3	Расход воды В, кг/м^3	В/Ц	Истинное В/Ц	Расход песка П, кг/м^3	Плотность смеси, кг/м^3	Объем песка V_n , отн ед.
Ц-1	1:0	1768	442	0,25	0,25	-	2210	-
Ц-2	1:0	1677	503	0,3	0,3	-	2180	-
Ц-3	1:0	1556	544	0,35	0,35	-	2100	-
Р-1	1:0,3	1412	424	0,3	0,275	424	2260	0,16
Р-2	1:1	991	348	0,35	0,27	991	2330	0,37
Р-3	1:3	456	318	0,7	0,36	1366	2140	0,52

Для определения плотности и прочности по ГОСТ 5802-86 использовали стандартные образцы 70,7x70,7x70,7 мм. Для проведения исследований по влиянию нагревания были изготовлены образцы каждого материала диаметром и высотой 33 мм. Выбор таких размеров образцов был обусловлен использованием именно таких образцов в исследованиях, описанных в работах [2, 4], а также необходимостью одновременного (в одних условиях) нагревания в печи всех исследованных материалов для исключения дополнительных погрешностей, возникающих при их нагревании в разных экспериментах.

Образцы изготавливали путем укладки смеси в стандартную и специальную опалубку с последующим уплотнением смеси на вибростоле в течение 30 с. После выдержки в опалубке в течение суток образцы распалубливали, маркировали и хранили в камере нормального твердения в течение 28 суток, а затем хранили до испытаний в нормальных температурно-влажностных условиях. Свойства исследованных материалов определяли по ГОСТ 5802-86 и приведены в таблице 2. В таблице приведены также определенные по диаграммам сжатия и ультразвуковым импульсным методом статический и динамический модуль деформации, а также ориентировочные значения прочности на растяжение, принятый по СП 63.13330.2012, исходя из соотношения между прочностью на сжатие и растяжение для мелкозернистых бетонов.

Таблица 2.

Свойства исследованных растворов

Шифр состава	Плотность γ , кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на растяжение, МПа	Модуль деформации	
				статический, 10 ⁴ МПа	динамический, 10 ⁴ МПа
Ц-1	2030	38,4	2,3	2,55	4,7
Ц-2	1920	37,9	2,2	2,55	4,4
Ц-3	1820	31,2	2,1	2,4	4,2
Р-1	2080	49,5	2,6	2,8	5,6
Р-2	2110	41,7	2,3	2,6	5,6
Р-3	1960	9,0	0,85	1,3	2,9

В качестве воздействия принято нагревание. Нагревание гораздо более доступно, чем облучение в ядерном реакторе, а выводы, полученные для термических деформаций, будут справедливы и для радиационных деформаций. Это объясняется известной аналогией между механизмами протекания радиационных и термических деформаций на уровне взаимодействия заполнителей и цементного камня и использования одинаковых формул для их аналитического определения. Нагревание проводили в муфельной печи последовательно до температур 105 °С, 200 °С, 300 °С и 400 °С. Максимальную температуру выбирали, чтобы исключить влияние образования при нагревании свободной окиси кальция.

До нагревания образцов измеряли их массу, размеры и скорость прохождения ультразвука. На стандартных образцах определяли плотность и прочность на сжатие.

Нагревание материалов (по три образца каждого состава) проводили со скоростью 100-150 °С/ч и выдерживали при требуемой температуре 4 ч после ее достижения. Испытания образцов проводили после полного остывания образцов вместе с печью после каждого нагревания. Определяли массу, линейные размеры, скорость ультразвука после нагревания до 105 °С, 200 °С, 300 °С и выдержки, а также прочность при сжатии после нагревания при 400 °С. На основании сравнения значений свойств до и после нагревания определяли относительные их изменения по отношению к значениям до нагревания.

Массу образцов измеряли на весах с точностью 0,05 г; размеры – микрометром с точностью 0,01 мм; скорость прохождения ультразвука – прибором УК-10П с измерением времени прохождения ультразвука с точностью 0,1 мкс; прочность на сжатие - на прессе со скоростью 0,6-1 МПа/с. Коэффициенты вариации полученных значений составляли в основном 0,1-0,3% при измерении массы, 0,01-0,03% - при измерении размеров, 3-5% -

при определении скорости ультразвука, 10-13% - при определении прочности.

Расчетное определение термических деформаций исследованных растворов проводили с использованием указанного выше существующего метода аналитического определения радиационных и термических деформаций бетонов и растворов, описанного в работах [1 - 4], основанного на моделях, показанных на рис. 1.

В общем виде по данным [1 - 4] для аналитического определения радиационных и термических деформаций растворов используется формула:

$$\frac{\Delta V_P}{V_{P0}} = 100 \left\{ \left(1 + \frac{\Delta V_{II}}{V_{II0}} \frac{1}{100} \right)^{1/3} (C_{yn}^n)^{1/3} + [1 - (C_{yn}^n)^{1/3}] \left(1 + \frac{\Delta V_{ЦК}}{V_{ЦК0}} \frac{1}{100} \right)^{1/3} \right\}^3 - 100 \approx$$
$$\approx \frac{\Delta V_{II}}{V_{II0}} (C_{yn}^n)^{1/3} + [1 - (C_{yn}^n)^{1/3}] \frac{\Delta V_{ЦК}}{V_{ЦК0}} \quad (1)$$

где $\frac{\Delta V_P}{V_{P0}}$ - относительное изменение объема раствора после облучения или нагревания, как отношение абсолютного изменения объема ΔV_P к объему до воздействия нагревания V_{P0} , % ; $\frac{\Delta V_{II}}{V_{II0}}$ - относительное изменение объема песка после облучения или нагревания, как отношение абсолютного изменения объема ΔV_{II} к объему до воздействия нагревания V_{II0} , % ; $\frac{\Delta V_{ЦК}}{V_{ЦК0}}$ - относительное изменение объема камня после нагревания, как отношение абсолютного изменения объема и размеров $\Delta V_{ЦК}$ к объему до воздействия нагревания $V_{ЦК0}$, % ; C_{yn}^n - степень уплотнения песка в растворе, определяемая по формуле:

$$C_{yn}^n = V_n / V_{yn}^n, \quad (2)$$

где V_n - относительное объемное содержание песка в растворе, в данном случае по таблице 1; V_{yn}^n - относительный объем, который может занимать заполнитель в виде песка в уплотненном состоянии (без прослоек портландцемента), определяемый по насыпной плотности заполнителей после уплотнения вибрацией. При $\gamma_{n.n.y.} = 1800 \text{ кг/м}^3$ и $\gamma_{n.u.} = 2650 \text{ кг/м}^3$ $V_{yn}^n = \gamma_{n.n.y.} / \gamma_{n.u.} = 1800/2650 = 0,68$.

Относительное изменение объема раствора за счет образования трещин $\left(\frac{\Delta V_P}{V_{PO}}\right)_{TP}$ (то есть относительный объем трещин V_{TP}) определяется по формуле:

$$\left(\frac{\Delta V_P}{V_{PO}}\right)_{TP} = V_{TP} = \frac{\Delta V_P}{V_{PO}} - \frac{\Delta V_{II}}{V_{ПО}} V_{II} - (1 - V_{II}) \frac{\Delta V_{ЦК}}{V_{ЦК0}} \quad (3)$$

В настоящей работе вместо изменений объема рассматривали и определяли изменение размеров образцов материалов, так как в формулах (1) и (3) вместо относительных изменений объема $\frac{\Delta V}{V}$ можно использовать и определять относительные изменения размеров $\frac{\Delta \ell}{\ell}$. При этом использовали формулы:

$$\frac{\Delta \ell_P}{\ell_{PO}} = \frac{\Delta \ell_{II}}{\ell_{ПО}} (C_{yn}^n)^{1/3} + [1 - (C_{yn}^n)^{1/3}] \frac{\Delta \ell_{ЦК}}{\ell_{ЦК0}}, \quad (4)$$

$$\left(\frac{\Delta \ell_P}{\ell_{PO}}\right)_{TP} = V_{TP} / 3 = \frac{\Delta \ell_P}{\ell_{PO}} - \frac{\Delta \ell_{II}}{\ell_{ПО}} V_{II} - (1 - V_{II}) \frac{\Delta \ell_{ЦК}}{\ell_{ЦК0}}. \quad (5)$$

где $\frac{\Delta \ell_P}{\ell_{PO}}$, $\frac{\Delta \ell_{II}}{\ell_{ПО}}$, $\frac{\Delta \ell_{ЦК}}{\ell_{ЦК0}}$, $\left(\frac{\Delta \ell_P}{\ell_{PO}}\right)_{TP}$ - изменения размеров раствора, заполнителя – песка, цементного камня, и раствора за счет изменения трещин.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований изменения размеров, массы и динамического модуля упругости цементных камней и растворов после нагревания при различных температурах представлены в таблице 3 и свидетельствуют о том, что после нагревания цементных камней и растворов происходит уменьшение размеров образцов (усадка), массы и динамического модуля упругости. Изменения возрастают с увеличением температуры нагревания. У растворов степень уменьшения размеров и массы меньше, а модуля упругости в основном больше, чем у цементного камня.

Таблица 3.

Результаты экспериментального определения изменения размеров, массы и динамического модуля упругости исследованных цементных камней после нагревания

Шифр сос- тава	Относительные изменения размеров $\frac{\Delta\ell}{\ell}$, массы $\frac{\Delta M}{M}$ *, и динамического модуля упругости $\frac{\Delta E}{E}$ после нагревания, %											
	После 105 °С			После 200 °С			После 300 °С			После 400 °С		
	$\frac{\Delta\ell}{\ell}$	$\frac{\Delta M}{M}$	$\frac{\Delta E}{E}$	$\frac{\Delta\ell}{\ell}$	$\frac{\Delta M}{M}$	$\frac{\Delta E}{E}$	$\frac{\Delta\ell}{\ell}$	$\frac{\Delta M}{M}$	$\frac{\Delta E}{E}$	$\frac{\Delta\ell}{\ell}$	$\frac{\Delta M}{M}$	$\frac{\Delta E}{E}$
Ц-1	-0,15	-3,0	-1,0	-0,38	-4,5	-7,0	-0,65	-5,7	-21,2	-0,81	-6,5	-35,0
Ц-2	-0,24	-4,4	-2,7	-0,32	-5,2	-8,3	-0,68	-7,0	-24,0	-0,91	-7,8	-32,1
Ц-3	-0,25	-4,0	-3,4	-0,40	-4,8	-4,8	-0,65	-6,4	-23,0	-0,86	-7,3	-44,0
Р-1	-0,19	-4,1 (-5,0)	-5,8	-0,24	-4,4 (-5,2)	-13,4	-0,46	-5,8 (-7,3)	-24,1	-0,64	-6,4 (-8,9)	-26,6
Р-2	-0,16	-2,9 (-5,5)	-8,9	-0,19	-3,3 (-6,2)	-10,4	-0,27	-4,2 (-7,9)	-30,6	-0,36	-4,7 (-8,9)	-30,7
Р-3	-0,03	-0,9 (-3,4)	-31,1	-0,04	-1,0 (-3,7)	-36,2	-0,06	-1,7 (-6,4)	-56,4	-0,07	-2,0 (-7,9)	-57,6

*У растворов в скобках приведены расчетные значения относительного изменения массы цементного камня в составе растворов путем умножения относительного уменьшения массы растворов на отношение плотности к расходу цемента $\gamma/Ц$.

Характерно, что пересчет относительных потерь массы у растворов на относительную потерю массы их цементного камня показало, что они близки по величинам (таблица 3). Так как усадка цементного камня вызвана выделением из него воды и между величиной усадки и потерями массы

имеется корреляция [4, 10], из этого следовало, что выделение воды, а значит и усадка цементного камня в составе растворов происходят также как у чистого цементного камня и их значения можно принимать одинаковыми.

Это позволило с уверенностью использовать результаты исследования цементного камня для анализа результатов исследования растворов.

Результаты сравнения экспериментального и расчетного по формулам (1) – (3) изменения размеров исследованных растворов после нагревания при различных температурах представлены в таблице 4.

Таблица 4.

Результаты экспериментального и расчетного (по модели без учета остаточных микроструктурных напряжений) определения изменения размеров (полных и за счет образования трещин) исследованных растворов после нагревания

Шифр состава	Объемное содержание и степень уплотнения песка		Изменения размеров после нагревания полные в виде усадки (над чертой) и в том числе за счет образования трещин (под чертой) , %							
			После 105 °С		После 200 °С		После 300 °С		После 400 °С	
	V_n	$(C_{yn}^n)^{1/3}$	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент	Расчет
P-1	0,16	0,617	<u>-0,19</u> ≈0	<u>-0,077</u> 0,091	<u>-0,24</u> 0,012	<u>-0,114</u> 0,138	<u>-0,46</u> 0,086	<u>-0,25</u> 0,296	<u>-0,64</u> 0,082	<u>-0,33</u> 0,39
P-2	0,37	0,816	<u>-0,16</u> ≈0	<u>-0,037</u> 0,089	<u>-0,19</u> ≈0	<u>-0,055</u> 0,134	<u>-0,27</u> 0,139	<u>-0,12</u> 0,422	<u>-0,36</u> 0,182	<u>-0,16</u> 0,382
P-3	0,52	0,914	<u>-0,03</u> 0,066	<u>-0,022</u> 0,074	<u>-0,04</u> 0,104	<u>0,034</u> 0,178	<u>-0,06</u> 0,252	<u>-0,05</u> 0,262	<u>-0,07</u> 0,343	<u>-0,06</u> 0,353

Из таблицы 4 следует, что расчетные и экспериментальные изменения размеров отличаются между собой. Особенно значительные различия наблюдаются у растворов P-1 и P-2 с низким (0,16 и 0,37) содержанием заполнителя, Причем значения экспериментальной усадки в основном превышают значения расчетной усадки, а значения экспериментальных изменений размеров за счет образования трещин ниже расчетных. Это указывает на наличие у этих составов значимых остаточных микроструктурных напряжений, не релаксированных за счет образования

трещин. У раствора Р-3 с содержанием заполнителя 52% (типичного для растворов содержания) эти различия незначительны или близки между собой, что свидетельствует об отсутствии значимых остаточных микроструктурных напряжений за счет их релаксации в результате образования трещин в цементном камне.

Полученные значения разницы Δ между экспериментальными и расчетными значениями изменения размеров (усадки) исследованных растворов вместе с вычисленной разницей e между линейными деформациями заполнителя и цементного камня (в данном случае

$$e = \frac{\Delta l_{\text{п}}}{l_{\text{п0}}} - \frac{\Delta l_{\text{цк}}}{l_{\text{цк0}}} = 0 - \frac{\Delta l_{\text{цк}}}{l_{\text{цк0}}} = -\frac{\Delta l_{\text{цк}}}{l_{\text{цк0}}}) \text{ после нагревания при различных}$$

температурах приведены в таблице 5.

Таблица 5.

Полученные значения разницы Δ между экспериментальными и расчетными значениями изменения размеров (усадки) исследованных растворов вместе с вычисленной разницей e между линейными деформациями заполнителя и цементного камня после нагревания

Шифр состава	Объемное содержание песка V_n	Разница между экспериментальными и расчетными значениями изменения размеров (усадки) растворов Δ , % (над чертой) и разница между деформациями заполнителя и цементного камня e , % (под чертой) после нагревания до различных температур			
		После 105 °С	После 200 °С	После 300 °С	После 400 °С
Р-1	0,16	-0,11	-0,136	-0,21	-0,31
		0,20	0,30	0,65	0,86
Р-2	0,37	-0,12	-0,135	-0,15	-0,2
		0,20	0,30	0,65	0,86
Р-3	0,52	-0,008	-0,006	-0,01	-0,01
		0,25	0,40	0,65	0,86

Построенные по таблице 5 зависимости разницы Δ между экспериментальными и расчетными значениями изменения размеров (усадки) исследованных растворов после нагревания от относительного содержания

заполнителя песка и температуры нагревания приведены на рис. 2. Из рис. 2 и таблицы 5 видно, что разница между экспериментальными и расчетными изменениями размеров в основном уменьшается с увеличением относительного объемного содержания в растворе заполнителя – песка и возрастает с увеличением температуры нагревания и разности деформаций заполнителя и цементного камня.

Наиболее вероятно, что причиной разницы Δ между экспериментальными и расчетными значениями изменения размеров после нагревания растворов с низким содержанием заполнителей являются их деформации под действием остаточных напряжений, которые не учитывали в расчетах по имеющемуся аналитическому методу.

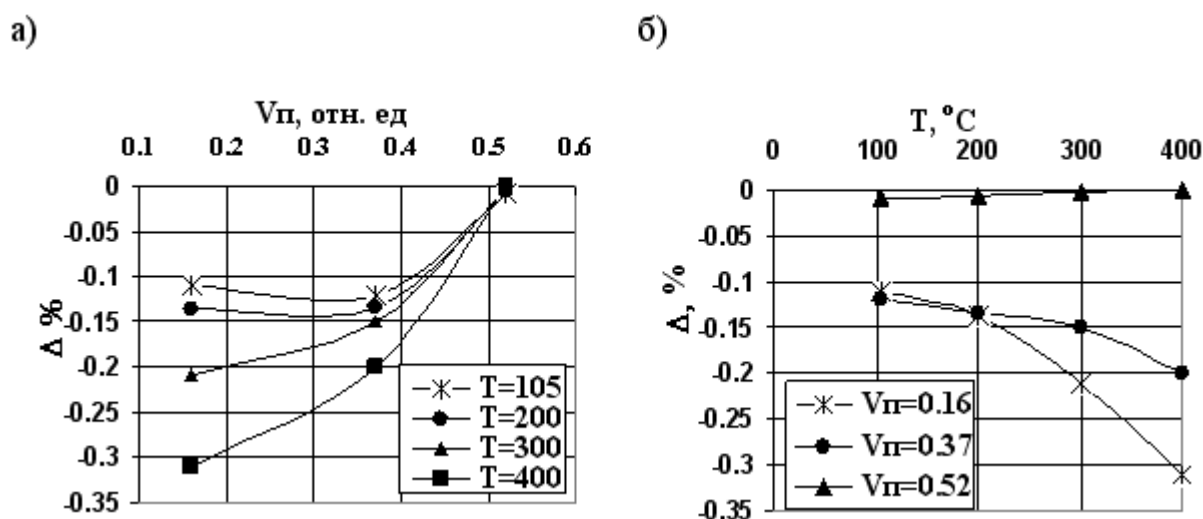


Рис. 2. Зависимости разницы Δ между экспериментальными и расчетными значениями изменения размеров (усадки) исследованных растворов после нагревания от относительного содержания заполнителя песка $V_{п}$ (а) и температуры нагревания T , °C (б)

Микроструктурные напряжения, которые остались в материалах после их релаксации за счет образования трещин в цементном камне можно оценить с использованием модели, описанной в работах [11, 12] и показанной на рис. 3.

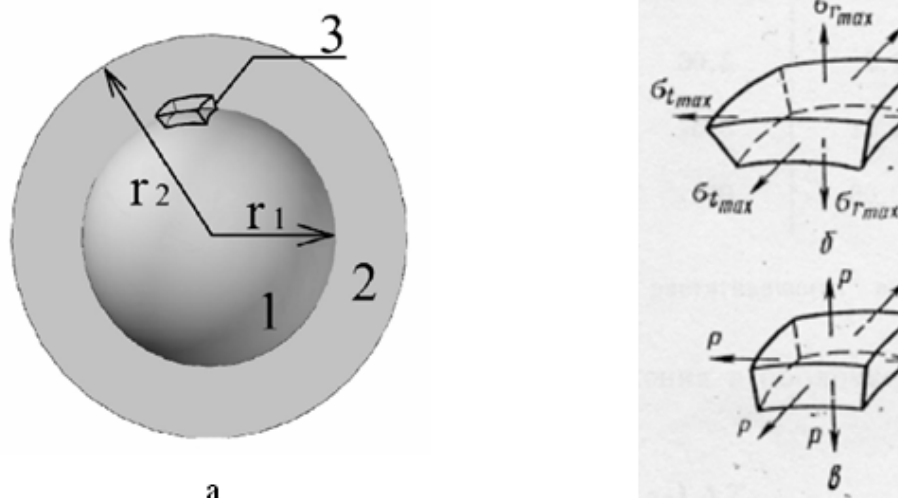


Рис. 3. Модель, описанная в работах [11, 12], структурной ячейки бетона (раствора), использованная для оценки остаточных после релаксации микроструктурных напряжений.

а – зерно (1) с оболочкой (2) и элементарным объемом (3); б и в – схемы напряженного состояния элементарного объема оболочки и зерна.

Эта модель рассматривает фрагмент бетона или раствора в виде зерна заполнителя (щебня или песка), окруженного оболочкой (из раствора или цементного камня) и позволяет рассчитать напряженно-деформированного состояния модели при различиях в их термических или других деформациях, но при отсутствии трещинообразования (без учета релаксации). Однако ее можно адаптировать к ситуации образования в растворе трещин и релаксации за счет этого микроструктурных напряжений, если учитывать, что при растрескивании цементного камня под действием тангенциальных растягивающих напряжений, одновременно будут релаксировать сжимающие усилия в заполнителе и цементном камне (радиальные напряжения). Причем, если при рассмотрении деформаций в тангенциальном направлении необходимо учитывать и образование и раскрытие трещин, что достаточно сложно, то при рассмотрении деформаций в радиальном направлении этого не требуется, так как трещины в радиальном направлении образовываться не

должны, так как прочность на сжатие приблизительно в 10 раз больше, чем на растяжение.

Тогда деформации модели в радиальном направлении под действием остаточных напряжений можно приравнять к величине разницы Δ между экспериментальными и расчетными значениями изменения размеров бетонов и растворов и описать, например, для раствора выражением:

$$\Delta = \frac{P2r_1}{3K_{II}} + \frac{\sigma_r(1-2r_1)}{2E_{ЦК}} + \frac{\sigma_t(1-2r_1)}{E_{ЦК}} 2\mu_{ЦК}, \quad (6)$$

где P – сжимающее давление, воздействующее на заполнитель (имеет знак минус), МПа; K_{II} - модуль всестороннего сжатия заполнителя – песка (для кварца по [13] $K_{II}=3,69 \cdot 10^4$ МПа); r_1 - радиус зерна заполнителя в модели рис. 3, равный в долях единицы применительно к рассматриваемой модели $2r_1 = (C_{yn}^n)^{1/3}$; σ_r - средние радиальные напряжения в цементном камне, равные $P/2$; σ_t - тангенциальные напряжения в цементном камне, равные Pk ; $E_{ЦК}$ - модуль деформации оболочки модели - цементного камня, МПа (в данном случае $E_{ЦК} = 2,5 \cdot 10^4$ МПа); $\mu_{ЦК} = 0,2$ – коэффициент Пуассона цементного камня; k - отношение тангенциальных растягивающих напряжений в оболочке цементного камня модели (с запасом рассматривали максимальные) к давлению P , определяемое исходя из формул модели выражениями:

$$k = \frac{\sigma_{t \max}}{P} = -\frac{2+x^3}{2(x^3-1)}, \quad (7)$$

$$x = 1/2r_1, \quad (8)$$

где $\sigma_{t \max}$ - тангенциальных максимальных растягивающих напряжений в оболочке цементного камня модели.

Тогда для определения остаточных напряжений при экспериментально установленной разности Δ между экспериментальными и расчетными

значениями изменения размеров бетонов и растворов, исходя из выражения (6), можно воспользоваться формулами:

$$P = \Delta \left[\frac{2r_1}{3K_{II}} + \frac{(1-2r_1)}{2E_{ЦК}} + \frac{k(1-2r_1)}{E_{ЦК}} 2\mu_{ЦК} \right]^{-1}, \quad (9)$$

$$\sigma_{t\max} = Pk \quad (10)$$

Результаты определения по формулам (9) и (10) остаточных после релаксации за счет растрескивания и теоретических при отсутствии релаксации микроструктурных напряжений в исследованных растворах после нагревания приведены в таблице 6. Видно, что минимальные остаточные микроструктурные напряжения после нагревания за счет релаксации вследствие максимального растрескивания наблюдаются в растворе Р-3 с максимальным относительным объемным содержанием заполнителя - песка (0,52). У растворов Р-2 (0,27 – заполнителя) и особенно Р-1 (0,16 - заполнителя) эти напряжения за счет меньшей релаксации вследствие меньшего растрескивания значительно выше и в основном возрастают с уменьшением содержания заполнителей.

Таблица 6.

Результаты определения по формулам (9) и (10) остаточных после релаксации за счет растрескивания и теоретических при отсутствии релаксации микроструктурных напряжений в исследованных растворах после нагревания

Шифр состава	Объемное содержание песка V_n	Остаточные после релаксации микроструктурные напряжения в виде всестороннего давления Р на заполнитель-песок (над чертой) и тангенциальных максимальных растягивающих напряжений $\sigma_{t\max}$ в оболочке цементного камня (под чертой), МПа			
		После 105 °С	После 200 °С	После 300 °С	После 400 °С
Р-1	0,16	-58,2	-73,2	-113,1	-167,1
		55,9	70,4	120,2	160,6
Р-2	0,37	-68,2	-76,7	-85,5	-113,8
		155,9	175,3	195,4	260,1
Р-3	0,52	-4,6	-3,5	-5,8	-2,2
		24,7	18,4	31,5	11,9

Правда вызывает удивление, что остаточные растягивающие напряжения в цементном камне, не смотря на их релаксацию, значительно превышают прочность цементного камня на растяжение (2,1 - 2,3 МПа), тогда как они должны релаксировать за счет растрескивания до этой величины. Однако это может быть связано, во-первых, с тем, что в соответствии с известной теорией прочности Вейбулла прочность цементного камня в достаточно тонких прослойках цементного камня между зернами заполнителей значительно выше прочности, установленной на больших образцах. Во-вторых, возможно, что участки цементного камня увеличенной толщины в местах примыкания нескольких зерен заполнителя, не учитываемые в модели, разгружают самые тонкие участки прослоек цементного камня, которые учитываются в модели. Эти напряжения фактически являются условными напряжениями в цементном камне в рамках рассматриваемой модели с тонкими оболочками. Решающее значение имеют сжимающие напряжения в заполнителе и цементном камне, в основном определяющие деформацию модели, значения которых правдоподобны.

То, что причиной различий между расчетными и экспериментальными термическими деформациями растворов с низким содержанием заполнителей являются остаточные микроструктурные напряжения, из-за меньшего растрескивания подтверждают данные об изменении динамического модуля упругости. Более значительное снижение модуля упругости у раствора Р-3 чем у растворов Р-2 и Р-3 свидетельствует о том, что степень растрескивания у раствора Р-3 более значительна, чем растворов Р-2 и Р-1. Это совпадает с результатами определения степени растрескивания.

Таким образом, выполненные исследования показали, что при аналитическом определении термических деформаций растворов с низким содержанием заполнителей по существующей методике результаты расчетов отличаются от экспериментальных данных вследствие не учета остаточных напряжений, вызывающих сжатие материала и прежде всего его

заполнителей. При содержании заполнителей менее 52% необходимо учитывать вызванную этими напряжениями поправку Δ , значения которой увеличивается с уменьшением объемного содержания заполнителя-песка и ростом температуры нагревания, и могут приниматься по рис. 2 в интервале температур от 0 до 400 °С. Причем, учитывая, что по [1 - 4] для аналитического определения термических деформаций и для растворов, и для бетонов используется методика и модель единого вида, эта поправка может использоваться и для бетонов.

Учитывая аналогию в механизмах радиационных и термических деформаций бетонов и растворов, такую же поправку необходимо вводить и при аналитическом определении их радиационных изменений.

Однако для придания зависимостям рис. 2 универсальности и возможности использования для составов с любыми значениями усадки цементного камня и при наличии расширения заполнителей, а также при воздействии радиации, значения температуры, как одного из факторов, нужно заменить разностью деформаций заполнителя и цементного камня e .

Такие зависимости от величины e приведены на рис. 4.

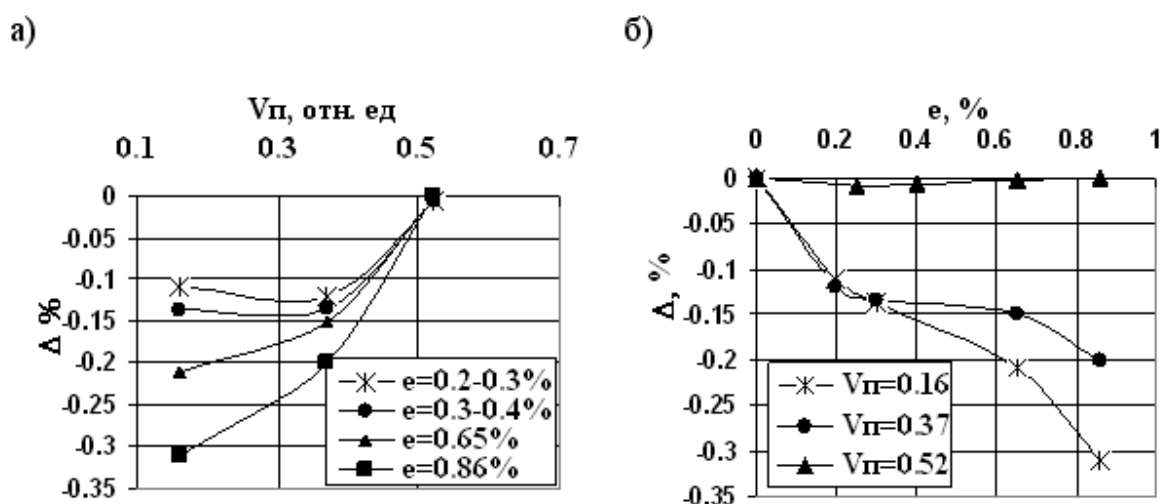


Рис. 4. Зависимости разницы Δ между экспериментальными и расчетными значениями изменения размеров (усадки) исследованных растворов от относительного содержания заполнителя песка $V_{п}$ (а) и разностью деформаций заполнителя и цементного камня e (б).

Вместе с тем в настоящей работе получены поправки Δ для температур от 105 до 400 °С и разностей деформаций заполнителя и цементного камня от 0,2 до 0,86 %. В этих интервалах температур и разностей деформаций поправка Δ возрастает. Однако физическая картина процесса подсказывает, что при дальнейшем увеличении этих факторов поправка Δ не может долго возрастать, а достигнув максимума должна уменьшаться до нуля. В связи с этим в дальнейшем необходимо провести дополнительные исследования в области температур более 400 °С и разностей деформаций более 0,86 %.

С некоторым запасом полученные данные можно применить при более значительных температурах и разностях деформаций следующим образом:

- при определении усадки после нагревания использовать экстраполяцию;
- при определении деформаций при нагревании и при воздействии радиации принимать поправку как при разности $e = 0,86$ %.

Необходимые для аналитического определения термических и радиационных изменений бетонов и растворов по методу, описанному в работах [1 – 4] соответствующие изменения цементного камня и заполнителей определяются по методам:

- аналитического определения радиационных, термических и радиационно-термических изменений цементного камня по данным о температуре и радиационным нагрузкам, описанным в работах [4, 10];
- аналитического определения радиационных и термических изменений материалов заполнителей бетонов и растворов по данным о соответствующих изменениях минералов, а также минералов по данным о радиационных нагрузках, описанных в работах [4, 14, 15].

Литература

1. Музалевский Л.П. Прогнозирование степени изменения прочности и радиационных деформаций бетона // Труды Третьей Всесоюзной научной
-

конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. Том V. Тбилиси: Из-во ТГУ, 1985. С. 116–125.

2. Музалевский Л.П. Радиационные изменения тяжелых бетонов и метод их аналитического определения: Дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н. М., 1989. 240 с.

3. Денисов А.В., Дубровский В.Б., Музалевский Л.П. Прогнозирование радиационных изменений неорганических строительных материалов // Вопросы атомной науки и техники. № 3. С. 98–102.

4. Денисов А.В., Дубровский В.Б., Соловьев В.Н. Радиационная стойкость минеральных и полимерных строительных материалов. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 284 с.

5. Агаханов Э.К., Курачев Р.М., Чепурненко А.С., Кулинич И.И. Нелинейная задача теплопроводности для радиационно-теплового экрана реактора АЭС. Инженерный вестник Дона, 2015, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3417.

6. Агаханов Э.К., Курачев Р.М. Напряженно-деформированное состояние радиационно-теплового экрана реактора АЭС. Инженерный вестник Дона, 2018, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5215.

7. Дубровский В.Б., Денисов А.В., Музалевский Л.П., Сугак Е.Б. Результаты оценки радиационных изменений бетонов на различных заполнителях для выбора бетонов радиационной защиты. Вопросы атомной науки и техники. 1988. №1. С. 76-79.

8. Denisov A.V. The impact of superplasticizers on the radiation changes in Portland cement stone and concretes. Magazine of Civil Engineering. 2017. №5. Pp. 70–87.

9. Denisov A. Radiation changes in serpentinite concretes of "dry" radiation shield in nuclear power plants //: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 21, Construction - The Formation of Living Environment. 2018. p. 032028.

10. Денисов А.В., Дубровский В.Б., Ершов В.Ю., Корневский В.В., Музалевский Л.П., Сугак Е.Б. Радиационно-температурные изменения свойств портландцементного камня бетона и зависимости для их прогнозирования // Вопросы атомной науки и техники. 1989. №2. С. 20–35.

11. Горчаков Г.И., Лифанов И.И., Терехин Л. Н. Коэффициенты температурного расширения и температурные деформации строительных материалов. М.: Комитет стандартов.1968. 167 с.

12. Состав, структура и свойства цементных бетонов. Под ред. Г. И. Горчакова. М.: Стройиздат, 1978. 45 с.

13. Справочник физических констант горных пород. Под общей редакцией С. Кларка мл. Пер. с англ. М.: Мир, 1969. 544 с.

14. Денисов А.В. Радиационные изменения заполнителей тяжелых бетонов и метод их аналитического определения: Дисс. на соиск. учен. степ. к.т.н. М., 1986. 276 с.

15. Denisov A.V., Sprince A. Analytical determination of thermal expansion of rocks and concrete aggregates. Magazine of Civil Engineering. 2018. №4. Pp. 151–170.

References

1. Muzalevskiy L.P. Trudy Tretey Vsesoyuznoynauchnoy konferencii po zashchite ot ioniziruyushchihizlucheniy yaderno-tekhnicheskikh ustanovok. Vol. 5.Tbilisi: Iz-vo TGU, 1985. Pp. 116–125. (rus)

2. Muzalevskiy L.P. Radiatsionnye izmeneniya tyazhelyh betonov i metod ih analiticheskogo opredeleniya [Radiating changes of heavy concrete and method of their analytical definition]. PhD dissertation. Moscow, 1989. 240 p.

3. Denisov A.V., Dubrovskiy V.B., Muzalevskiy L.P. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. 1990. No. 3. Pp. 98–102.

4. Denisov A.V., Dubrovskiy V.B., Solovov V.N. Radiatsionnaya stoykost mineralnyh i polimernykh stroitelnykh materialov [Radiating stability of mineral and polymeric building materials]. Moscow: Izdatelskiy dom MEI, 2012. 284 p.

5. Agakhanov Eh.K., Kurachev R.M., Chepurnenko A.S., Kulinich I.I. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3417.

6. Agakhanov Eh.K., Kurachev R.M. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5215.

7. Dubrovskiy V.B., Denisov A.V., Muzalevskiy L.P., Sugak E.B. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. 1988. No. 1. Pp. 76–79.

8. Denisov A.V. Magazine of Civil Engineering. 2017. №5. Pp. 70–87.

9. Denisov A. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 21, Construction - The Formation of Living Environment. 2018. p. 032028.

10. Denisov A.V., Dubrovskiy V.B., Yershov V.Yu., Korenevskiy V.V., Muzalevskiy L.P., Sugak E.B. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. 1989. № 2. Pp. 20–35.

11. Gorchakov G.I., Lifanov I.I., Terekhin L. N. Koehffitsienty temperaturnogo rasshireniya i temperaturnye deformatsii stroitelnykh materialov [Coefficients of thermal expansion and thermal deformation of building materials]. Moscow: Komitet standartov. 1968. 167 p.

12. Sostav, struktura i svoystva tsementnykh betonov [Composition, structure and properties of cement concretes]. Pod red. G. I. Gorchakova. Moscow: Stroyizdat, 1978. 45 p.

13. Spravochnik fizicheskikh konstant gornyh porod [Handbook of physical constants of rocks]. Pod obshchey redaktsiey S.Klarka ml. Per. s angl. Moscow: Mir. 1969. 544 p.

14. Denisov A.V. Radiatsionnye izmeneniya zapolniteley tyazhelykh betonov i metod ih analiticheskogo opredeleniya [Radiation-induced alteration of



aggregates of heavy concretes, and method for their analytical determination]. PhD dissertation. Moscow, 1986. 276 p.

15. Denisov A.V., Sprince A. Magazine of Civil Engineering. 2018. № 4. Pp. 151–170.