

## Влияние минерального состава и структуры заполнителей на термическое расширение обычных и жаростойких бетонов

*А.В. Денисов*

*Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** Работа выполнена в связи с тем, что нормативные документы, используемые при проектировании конструкций, работающих при повышенных и высоких температурах, не учитывают особенности минерального состава и структуры заполнителей бетонов. В этом состоит главный недостаток таких документов, так как минеральный состав и структура заполнителей могут существенно отличаться даже у материалов одного наименования, что может значительно влиять на термические изменения бетонов.

В связи с невозможностью экспериментально исследовать все многообразие бетонов на заполнителях различного минерального состава и структуры, в работе выполнено расчетно-аналитическое исследование на основании существующих методов аналитического определения термических изменений бетонов и их составляющих. На основании этих методов рассчитано и исследовано влияние на термическое расширение бетонов наличия и количества в материалах заполнителей, наиболее расширяющихся при нагревании минералов (арагонита, кальцита, кварца, кристобалита, калиевых полевых шпатов, пироксенов) и стекла, а также среднего размера кристаллов, слагающих заполнители минералов. Рассмотрены тяжелые портландцементные бетоны на заполнителях из известняков, доломитов, гранитов, сиенитов, диоритов, базальтов, диабазов, боя глиняного кирпича, шамота и шлаков.

На основании расчетов установлено, что значения термического изменения объема бетонов, полученные по данным СП 27.13330.2017, совпадают с расчетными значениями только при определенных сочетаниях минерального состава и структуры заполнителей по среднему размеру кристаллов. В остальных случаях реальное термическое расширение бетонов может быть и меньше, и больше значений, полученных по СП 27.13330.2017. Установлены закономерности влияния на термическое расширение бетонов содержания различных минералов и среднего размера кристаллов минералов в заполнителях.

**Ключевые слова:** термическое расширение, обычные и жаростойкие бетоны, заполнители, минералы, стекло, влияние минерального состава и структуры заполнителей.

### Введение

При проектировании конструкций, эксплуатируемых при повышенных и высоких температурах, выбор бетонов и учет их термических изменений осуществляется по СП 27.13330.2017 (Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. Актуализированная редакция СНиП 2.03.04-84. М.: Стройиздат, 2017) на основании температур эксплуатации, вида вяжущего и заполнителя, наличия тонкомолотой добавки. При этом все

---

параметры жаростойкости бетонов по виду заполнителя привязаны только к наименованию (виду) материалов заполнителей, без учета состава и строения материалов заполнителя. Не учитывают и требования к заполнителям жаростойких бетонов, описанные в Справочном пособии к СНиП 3.09.01-85 и СНиП 3.03.01-87 (Технология изготовления жаростойких бетонов. Справочное пособие к СНиП 3.09.01-85 и СНиП 3.03.01-87. М.: Стройиздат, 1991).

Вместе с тем известно, что термические изменения бетонов, особенно термическое расширение, в значительной степени определяются термическими изменениями заполнителей [1–3], а заполнителей – их минеральным составом и структурой [4–6]. В то же время минеральный состав и структура материалов (прежде всего среднего размера кристаллов минералов), особенно горных пород, могут существенно отличаться даже у материалов одного наименования. В связи с этим, исследование влияния минерального состава и структуры заполнителей на термические изменения, особенно термическое расширение, тяжелых бетонов, является актуальным.

Экспериментальные исследования влияния минерального состава и структуры заполнителей на термические изменения бетонов достаточно трудоемки и дорогостоящи. Кроме того, экспериментально исследовать все многообразие бетонов на заполнителях различного минерального состава и структуры практически невозможно.

Однако имеются разработанные и экспериментально апробированные методы аналитического определения радиационных, термических и радиационно-термических изменений бетонов и их составляющих (заполнителей и цементного камня), наиболее полно представленные в работах [7–9].

Эти методы в комплексе позволяют рассчитывать не только радиационные и радиационно-термические, но и термические изменения

---

бетонов по данным о температуре нагревания, технологическом составе бетона, минеральном составе и структуре заполнителей, характеристиках цемента и добавок. В работах [7, 8, 10] это объясняется аналогией в механизмах радиационного и термического расширения горных пород – заполнителей, растворов и бетонов на уровне взаимодействия кристаллов минералов горных пород и компонентов (цементного камня и заполнителей) растворов и бетонов. Причем в работе [10] для горных пород и заполнителей бетонов, а в работе [8] для растворов и бетонов тщательно показана возможность применения разработанных методов расчета их радиационного расширения для расчетов термического расширения этих материалов.

В связи с этим, целью настоящей работы является расчетно-аналитическое исследование влияния минерального состава и структуры заполнителей на термические изменения тяжелых обычных и жаростойких бетонов с использованием существующих аналитических методов.

### **Методика исследования**

Расчеты термического расширения бетонов при нагревании до различных температур проводили в следующей последовательности.

1. По данным работ [11, 12] принимали значения изменений размеров и объема кристаллов минералов при нагревании до исследованных температур.

2. По методике, описанной в работах [7, 9], рассчитывали термическое увеличение объема материалов заполнителей бетона (щебня, песка и тонкомолотой добавки) по данным об изменениях размеров и объема кристаллов минералов, полученным на этапе 1, на основании данных о минеральном составе, структуре, модуле упругости.

3. По методике расчета термической усадки цементного камня, представленной в работе [9] с учетом данных работ [1, 2, 13] о термическом расширении цементного камня при повторном нагревании рассчитывали

термические изменения объема цементного камня бетона при нагревании до значений исследованных температур;

4. По методике, описанной в работе [9], рассчитывали термические изменения объема цементного камня бетона с тонкомолотой добавкой, как микрораствора, по полученным на этапе 2 и 3 изменениям объема тонкомолотой добавки и цементного камня. Однако в связи с тем, что частицы тонкомолотой добавки соизмеримы с размерами капиллярных пор цементного камня учитывали, что часть тонкомолотой добавки попадает в капиллярные поры и поэтому не участвует в термическом расширении. При этом, на основании анализа данных работы [1] по термическому расширению цементных камней с тонкомолотой добавкой принимали, что тонкомолотая добавка заполняет около 35% объема капиллярных пор, определяемого по методике работы [14].

5. По методике, представленной в работах [8, 9], рассчитывали термические изменения объема раствора бетона по полученным на этапе 2–4 изменениям объема песка и цементного камня.

6. По методике, описанной в работах [8, 9], рассчитывали термические изменения объема бетона по полученным на этапе 2 и 5 изменениям объема щебня и раствора.

В работе рассматривали термическое расширение только тяжелых бетонов на портландцементе и его разновидностях. Тяжелые бетоны наиболее широко применяются в конструкциях. Кроме того, разработанные аналитические методы надежно апробированы только на примере тяжелых бетонов. Что касается бетонов на жидком стекле и глиноземистых цементах, то результаты, полученные для бетонов на портландцементе, будут справедливы и для бетонов на других вяжущих веществах. Объясняется это тем, что термическое расширение бетонов по данным [9, 11, 12] определяется, прежде всего, термическим расширением заполнителей.

---

Рассматривали в основном бетоны зрелого возраста (по [9] 6 месяцев и более), так как к моменту начала эксплуатации объектов с бетонами, подвергаемыми воздействию повышенных и высоких температур, возраст бетонов составляет в основном не менее 6 месяцев.

В соответствии с СП 27.13330.2017 расчетно-аналитические исследования проводили для бетонов на заполнителях из следующих материалов, рассмотренных в этом документе: известняков и доломитов; гранитов и близких к ним гранодиоритов; сиенитов; диоритов; андезитов; базальтов и диабазов; боя глиняного кирпича; шамотов; шлаков.

Объемное содержание в бетонах заполнителей (в долях единицы) в соответствии с СН 156-79. (Инструкция по технологии приготовления жаростойких бетонов. М.: Стройиздат, 1979), действующими в период разработки СНиП 2.03.04-84, как основы СП 27.13330.2017, принимали равным:

- 0,70 - щебня + песка в бетонах без тонкомолотых добавок (на заполнителях из известняков и доломитов, гранитов, гранодиоритов, сиенитов);

- 0,65 - щебня + песка, 0,05 – тонкомолотой добавки в бетонах с тонкомолотой добавкой (на заполнителях из остальных материалов).

Выбор минералов, изменение содержания которых в материалах заполнителей должно быть наиболее значительным и поэтому их необходимо исследовать, осуществлялось на основании следующих результатов предварительных исследований:

- результатов сравнения величин относительного изменения объема и размеров (в наиболее расширяющемся направлении для анизотропных минералов) кристаллов различных минералов при нагревании по данным работ [14, 15].

---

- результатов анализа многочисленных литературных и интернет-источников о минеральном составе и пределах вариации содержания различных минералов в материалах рассматриваемых заполнителей.

В соответствии с этим, исследовали влияние изменения содержания следующих минералов в рассматриваемых материалах заполнителей:

- арагонита, кальцита и кварца (как наиболее расширяющихся минералов) в известняках и доломитах;
- кварца и калиевых полевых шпатов микроклина или ортоклаза (как наиболее расширяющихся минералов) в гранитах, гранодиоритах и сиенитах;
- кварца (как наиболее расширяющегося минерала) и стекла (как наименее расширяющейся составляющей) в диоритах и андезитах;
- пироксенов (как наиболее расширяющихся минералов) и стекла (как наименее расширяющейся составляющей) в базальтах и диабазах;
- кварца (как наиболее расширяющегося минерала) и стекла (как наименее расширяющейся составляющей) в бое глиняного кирпича;
- кварца и кристобалита (как наиболее расширяющихся минералов) в шамоте;
- кварца и диопсида (как наиболее расширяющихся минералов) и стекла (как наименее расширяющейся составляющей) в низкокальциевом шлаке;
- ранкинита и мервинита (как наиболее расширяющихся минералов), а также стекла (как наименее расширяющейся составляющей) в высококальциевом шлаке.

Выбор средних значений модулей упругости и размеров кристаллов материалов, рассматриваемых заполнителей, а также вариаций среднего размера кристаллов минералов принимали также по результатам анализа многочисленных литературных и интернет - источников.

Принятые при проведении расчетов варианты сочетаний минерального состава, среднего размера кристаллов и модуля упругости материалов заполнителей приведены в таблицах 1 и 2.

В связи с небольшим, по сравнению с заполнителями, влиянием тонкомолотых добавок в качестве тонкомолотой добавки во всех случаях рассматривали шамот, как наиболее широко используемый и изученный. При этом принимали следующий минеральный состав шамота добавки: кварц – 5%, кристобалит – 12%, муллит – 68%, стекло – 15%.

Температуры нагревания рассматривали, как в СП 27.13330.2017.

Таблица 1.

Варианты минерального состава, среднего размера кристаллов, слагающих заполнители минералов и модуля упругости  $E$  заполнителей, принятые при проведении расчетов термического расширения бетонов при исследовании влияния минерального состава заполнителей

№ п/п	Наименование бетона по заполнителю	Минеральный состав заполнителей					Средний размер кристаллов минералов $d$ , см		$E$ , $10^4$ МПа	
		Минералы*	Объемное содержание минералов по вариантам*, %					$d_{max}$		$d_{min}$
			№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Бетоны на заполнителях из известняков	<b>Арагонит</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	-	0,03	0,0001	6
		Кальцит	100	75	50	0	-			
2	Бетоны на заполнителях из известняков	<b>Кальцит</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	-	0,03	0,0001	6
		Доломит	100	75	50	0	-			
3	Бетоны на заполнителях из известняков	<b>Кварц</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	-	0,03	0,0001	6
		Кальцит	50	50	50	50	-			
		Доломит	50	45	40	35	-			
4	Бетоны на заполнителях и гранитов и гранодиоритов	<b>Кварц</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	-	0,3	0,003	6
		Микроклин или ортоклаз	50	40	35	30	-			
		Олигоклаз	30	30	25	20	-			
		Роговая обманка	10	10	10	10	-			

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	Бетоны на заполнителях и гранитов и гранодиоритов	Кварц	25	25	25	25	-	0,3	0,003	6
		<b>Микроклин или ортоклаз</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	-			
		Олигоклаз	55	45	25	5	-			
		Роговая обманка	10	10	10	10	-			
6	Бетоны на заполнителях из сиенитов	<b>Кварц</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	-	-	0,3	0,003	6
		Микроклин или ортоклаз	50	50	55	-	-			
		Олигоклаз	35	30	20	-	-			
		Роговая обманка	15	15	15	-	-			
7	Бетоны на заполнителях из сиенитов	<b>Микроклин или ортоклаз</b>	<b>30</b>	<b>50</b>	<b>75</b>	-	-	0,3	0,003	6
		Олигоклаз	55	35	10	-	-			
		Роговая обманка	15	15	15	-	-			
8	Бетоны на заполнителях из диоритов и андезитов	<b>Кварц</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	-	0,1	0,001	6
		Олигоклаз	80	75	70	65	-			
		Роговая обманка	10	10	10	10	-			
		Стекло	10	10	10	10	-			
9	Бетоны на заполнителях из диоритов и андезитов с кварцем	Кварц	5	5	5	5	-	0,1	0,001	6
		Олигоклаз	85	75	65	55	-			
		Роговая обманка	10	10	10	10	-			
		<b>Стекло</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	-			
10	Бетоны на заполнителях из диоритов и андезитов без кварца	Олигоклаз	90	80	70	60	-	0,1	0,001	6
		Роговая обманка	10	10	10	10	-			
		<b>Стекло</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	-			
11	Бетоны на заполнителях из базальтов и диабазов	Оливин	5	5	5	5	-	0,1	0,001	8
		Лабрадор	55	45	35	25	-			
		<b>Пироксен</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	-			
		Стекло	10	10	10	10	-			
12	Бетоны на заполнителях из базальтов и диабазов	Оливин	5	5	5	5	-	0,1	0,001	8
		Лабрадор	55	50	45	40	-			
		Пироксен	40	35	30	25	-			
		<b>Стекло</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	-			
13	Бетоны на заполнителях из боя глиняного кирпича	<b>Кварц</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>35</b>	-	-	0,03	0,000 1	6
		Анортит	20	15	10	-	-			
		Диопсид	10	10	10	-	-			
		Стекло	50	50	40	-	-			
		Гематит	5	5	5	-	-			



Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
14	Бетоны на заполнителях из глиняного кирпича с кварцем	Кварц	30	25	20	-	-	0,03	0,001	6
		Анортит	25	15	5	-	-			
		Диопсид	10	10	10	-	-			
		<b>Стекло</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	-	-			
		Гематит	5	5	5	-	-			
15	Бетоны на заполнителях из глиняного кирпича без кварца	Анортит	40	30	15	-	-	0,03	0,001	6
		Диопсид	25	20	20	-	-			
		<b>Стекло</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>60</b>	-	-			
		Гематит	5	5	5	-	-			
16	Бетоны на шамоте	<b>Кварц</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	0,03	0,003	6
		<b>Кристобалит</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>			
		Муллит	80	75	70	65	60			
		Стекло	20	20	20	20	20			
7	Бетоны на низкокальциевых шлаках	<b>Кварц</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	-	-	0,03	0,003	6
		Диопсид	40	40	40	-	-			
		Анортит	15	15	15	-	-			
		Стекло	45	40	35	-	-			
18	Бетоны на низкокальциевых шлаках с кварцем	Кварц	5	5	5	-	-	0,03	0,003	6
		<b>Диопсид</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>80</b>	-	-			
		Анортит	15	15	0	-	-			
		Стекло	60	30	15	-	-			
19	Бетоны на низкокальциевых шлаках без кварца	<b>Диопсид</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>80</b>	-	-	0,03	0,003	6
		Анортит	20	20	5	-	-			
		Стекло	60	30	15	-	-			
20	Бетоны на низкокальциевых шлаках	Кварц	5	5	0	-	-	0,03	0,003	6
		Диопсид	60	35	10	-	-			
		Анортит	15	10	0	-	-			
		<b>Стекло</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>90</b>	-	-			
21	Бетоны на высококальциевых шлаках	<b>Ранкинит, мервинит</b>	<b>15</b>	<b>30</b>	<b>60</b>	<b>100</b>	-	0,03	0,003	6
		Геленит, окерманит	40	35	20	0	-			
		Стекло	35	35	20	0	-			
22	Бетоны на высококальциевых шлаках	Ранкинит, мервинит	40	35	25	-	-	0,03	0,003	6
		Геленит, окерманит	40	35	25	-	-			
		<b>Стекло</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>50</b>	-	-			

\*Жирным шрифтом выделены минералы, влияние содержания которых исследовали при выполнении расчетов.

Таблица 2.

Варианты среднего размера кристаллов, слагающих заполнители минералов, минеральный состав и модуль упругости  $E$  заполнителей, принятые при исследовании влияния структуры заполнителей, термическое расширение бетонов

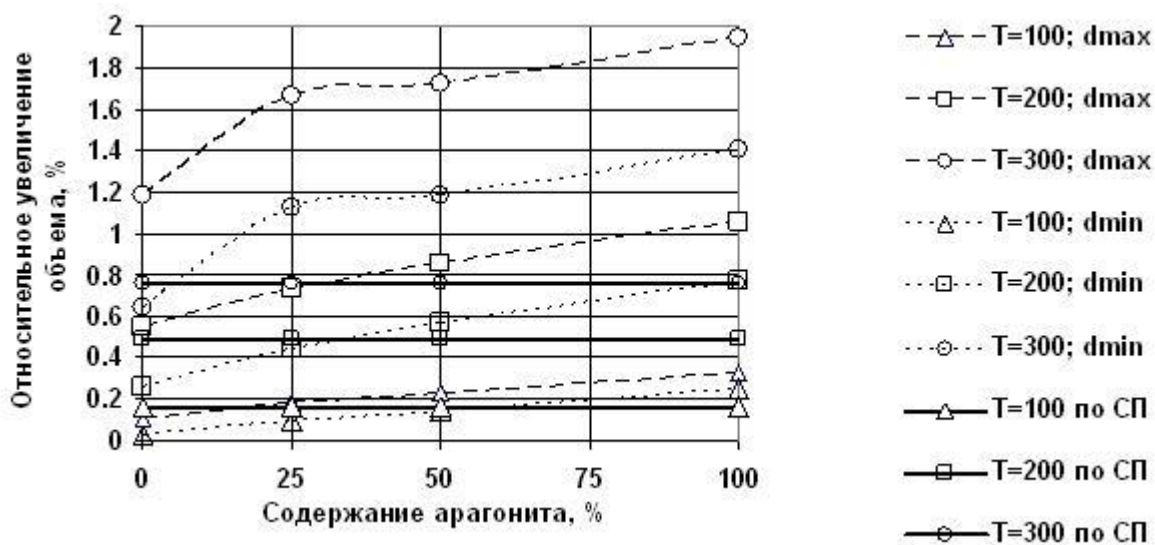
№ п/п	Наименование бетона по заполнителю	Средний размер кристаллов минералов по вариантам, см							Рассматриваемый средний минеральный состав, %	$E$ , $10^4$ МПа
		№ 1с	№ 2с	№ 3с	№ 4с	№ 5с	№ 6с	№ 7с		
1	Бетоны на известняках	0.001	0.003	0.01	0.03	0.1	0.3	1	1. Арагонит – 25% 2. Кальцит – 50% 3. Доломит – 25%	6
2	Бетоны на гранитах	-	0.003	0.01	0.03	0.1	0.3	1	1. Кварц – 25% 2. Микроклин – 40% 3. Олигоклаз – 25% 4. Роговая обманка-10%	6
3	Бетоны на базальтах и диабазах	0.001	0.003	0.01	0.03	0.1	0.3	1	1. Оливин – 5% 2. Лабрадор – 45% 3. Энстатит – 40% 4. Стекло-10%	8

### 3. Результаты исследований и их обсуждение

Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из известняков и доломитов при различных температурах нагревания от содержания арагонита (от 0 до 100%), кальцита (от 0 до 100%) и кварца (от 0 до 15%) в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{\max}=0,03$  см и  $d_{\min}=0,001$  см по результатам расчетов представлены на рис. 1, 2,а и 2,б. Видно, что термическое увеличение объема бетонов на этих заполнителях увеличивается с ростом в них содержания рассмотренных минералов. Особенно значительное увеличение термического расширения бетонов (в основном до 1,6–3 раза) наблюдается с ростом содержания в заполнителях арагонита. Увеличение термического расширения бетонов с ростом содержания в заполнителях кальцита составляет до 1,1–1,8, а кварца – до 1,1–1,3 раза. Термическое расширение бетонов на заполнителях из

материалов со средними размерами кристаллов минералов 0,03 см в 2–3 раза больше, чем на заполнителях со средними размерами кристаллов 0,001 см.

Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из гранитов и гранодиоритов при различных температурах нагрева от содержания кварца (от 10% до 40%) и микроклина или ортоклаза (от 10% до 60%) в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{\max}=0,3$  см и  $d_{\min}=0,003$  см по результатам расчетов представлены на рис. 3,а и 3,б. Видно, что термическое увеличение объема бетонов на этих заполнителях увеличивается с ростом в них содержания рассмотренных минералов. Увеличение термического расширения бетонов с ростом содержания в заполнителях этих минералов составляет до 1,3-1,8 раза. Термическое расширение бетонов на заполнителях из материалов со средними размерами кристаллов минералов 0,3 см в 1,3–1,8 раза больше, чем на заполнителях из материалов со средними размерами кристаллов минералов 0,003 см.



**Рис. 1. Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из известняков и доломитов при различных температурах нагрева  $T$  (в  $^{\circ}\text{C}$ ) от содержания арагонита в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{\max}=0,03$  см и  $d_{\min}=0,0001$  см по результатам расчетов.**

Для сравнения приведены изменения объема, вычисленные по коэффициентам линейной температурной деформации, представленным в СП 27.13330.2017, независимо от минерального состава и структуры.

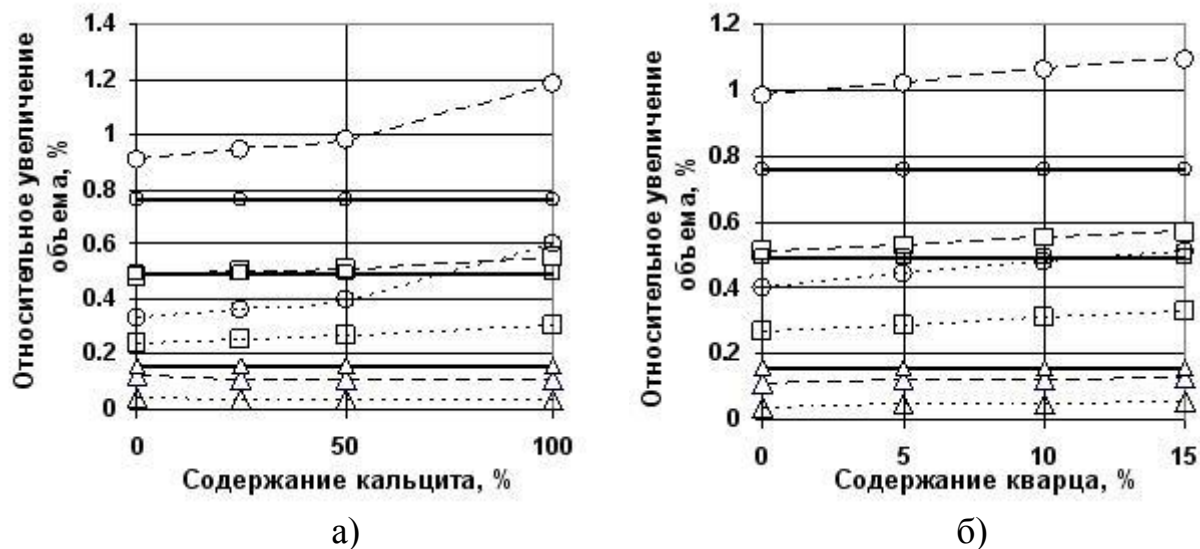


Рис. 2. Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из известняков и доломитов при различных температурах нагревания от содержания кальцита (а) и кварца (б) в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{max}=0,03$  см и  $d_{min}=0,0001$  см по результатам расчетов.

Условные обозначения, пояснения и привязка к температурам приведены на рис. 1.

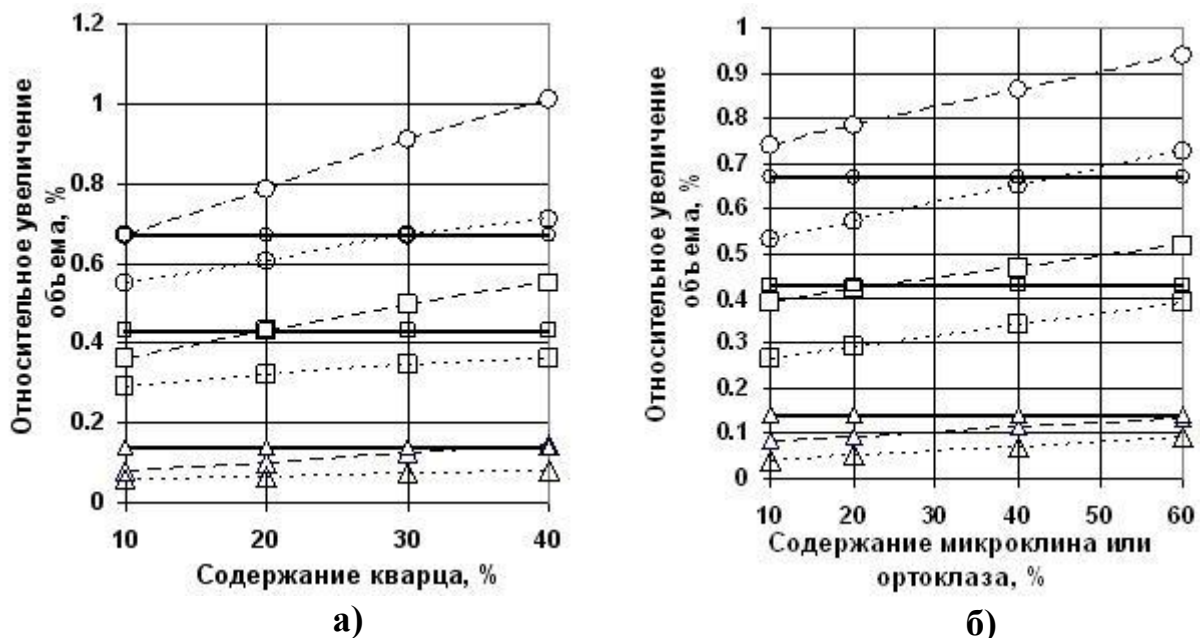


Рис. 3. Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из гранитов и гранодиоритов при различных температурах нагревания от содержания кварца (а) и микроклина или ортоклаза (б) в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{max}=0,3$  см и  $d_{min}=0,003$  см по результатам расчетов.

Условные обозначения, пояснения и привязка к температурам приведены на рис.1.

Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из сиенитов при различных температурах нагревания от содержания кварца (от 0 до 10%) и микроклина или ортоклаза (от 30% до 70%) в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{\max} = 0,3$  см и  $d_{\min} = 0,003$  см по результатам расчетов представлены на рис. 4,а и 4,б. Видно, что термическое увеличение объема бетонов на этих заполнителях увеличивается с ростом в них содержания рассмотренных минералов. Увеличение термического расширения бетонов с ростом содержания в заполнителях этих минералов составляет до 1,3–2,1 раза. Термическое расширение бетонов на заполнителях из материалов со средними размерами кристаллов минералов 0,3 см в 1,3–1,4 раза больше, чем на заполнителях из материалов со средними размерами кристаллов минералов 0,003 см.

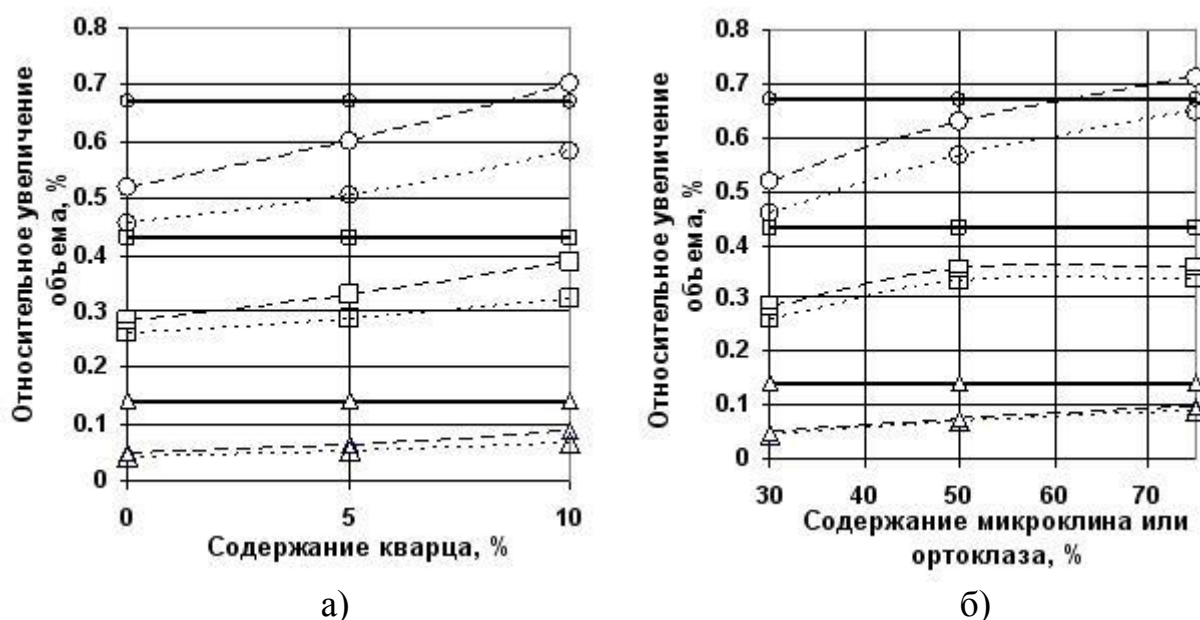
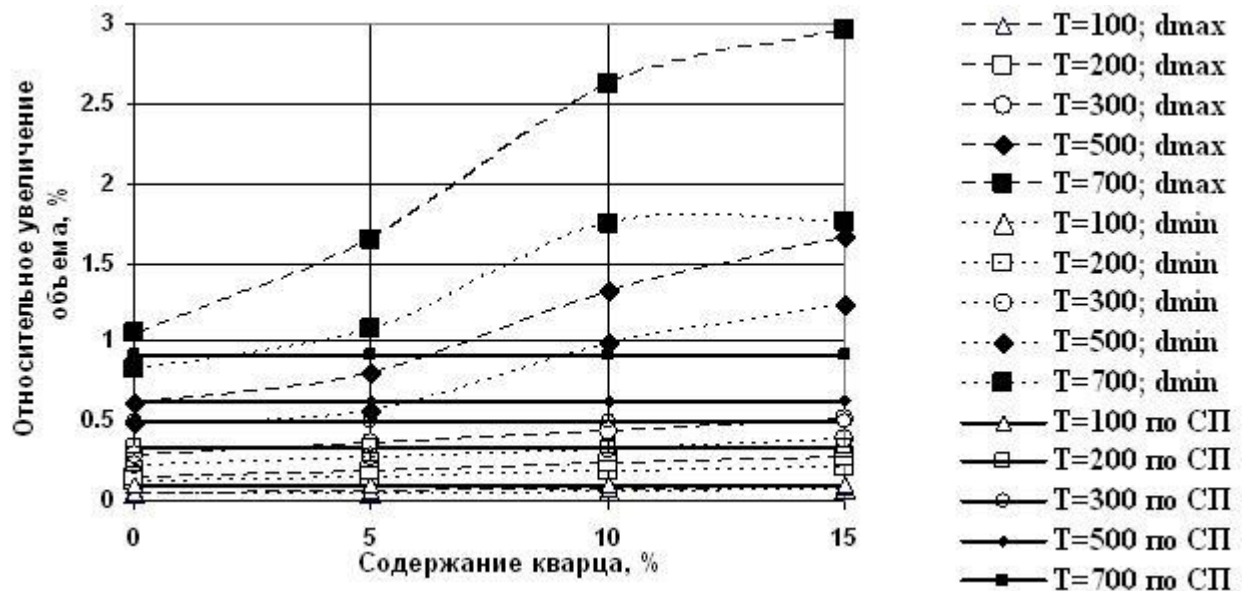


Рис. 4. Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из сиенитов при различных температурах нагревания от содержания кварца (а) и микроклина или ортоклаза (б) в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{\max}=0,3$  см и  $d_{\min}=0,003$  см по результатам расчетов. Условные обозначения, пояснения и привязка к температурам приведены на рис. 1.

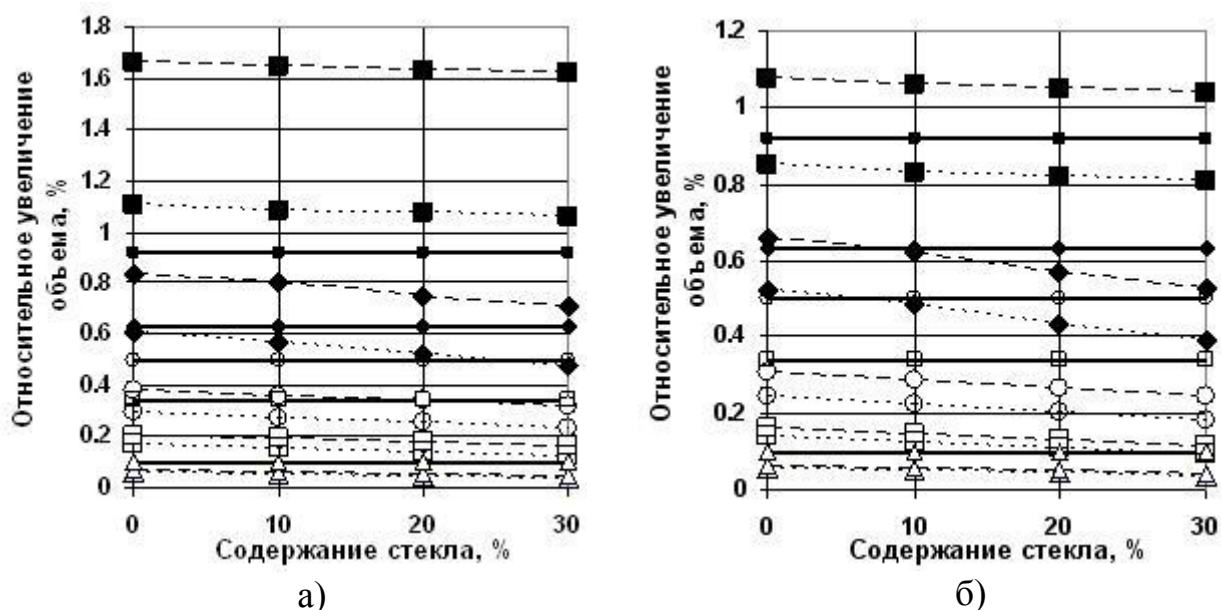
Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из диоритов и андезитов при различных температурах нагревания от содержания кварца (от 0 до 15%) и андезитов от содержания стекла (от 0 до 30%) в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{\max}=0,1$  см и  $d_{\min}=0,001$  см по результатам расчетов представлены на рис. 5, 6,а и 6,б. Видно, что термическое увеличение объема бетонов на диоритах и андезитах увеличивается с ростом в них содержания кварца. Увеличение термического расширения бетонов с ростом содержания в заполнителях кварца составляет до 1,5-2,8 раза. С ростом содержания стекла объемное термическое расширение бетонов наоборот уменьшается. Снижение термического расширения бетонов с ростом содержания в андезитах стекла составляет до 1,02-1,5 раза. Термическое расширение бетонов на заполнителях с размерами кристаллов минералов 0,1 см в 1,1-1,5 раза больше, чем на заполнителях с размерами кристаллов минералов 0,001 см.



**Рис. 5. Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из диоритов и андезитов при различных температурах нагревания  $T$  (в  $^{\circ}\text{C}$ ) от содержания кварца в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{\max}=0,1$  см и  $d_{\min}=0,001$  см по результатам расчетов.**

Для сравнения приведены изменения объема, вычисленные по коэффициентам линейной температурной деформации, представленным в СП 27.13330.2017.

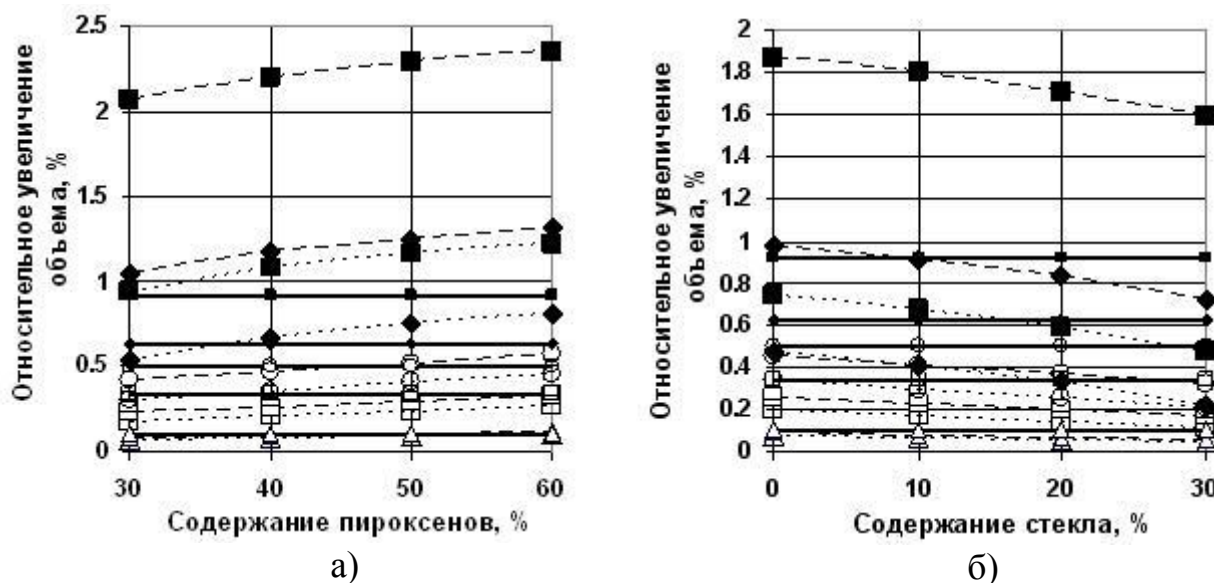




**Рис. 6. Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из содержащих кварц андезитов (а) и не содержащих кварц андезитов (б) при различных температурах нагревания от содержания стекла в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{max}=0,1$  см и  $d_{min}=0,001$  см по результатам расчетов.**

Условные обозначения, пояснения и привязка к температурам приведены на рис.5.

Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из базальтов и диабазов при различных температурах нагревания от содержания пироксенов (от 30% до 60%) и базальтов от содержания стекла (от 0 до 30%) в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{max}=0,1$  см и  $d_{min}=0,001$  см по результатам расчетов представлены на рис. 7,а и 7,б. Видно, что объемное термическое расширение бетонов на базальтах и диабазах увеличивается с ростом в них содержания пироксенов. Увеличение термического расширения бетонов с ростом содержания в заполнителях пироксенов составляет до 1,15–1,5 раз. С ростом содержания стекла объемное термическое расширение бетонов наоборот уменьшается. Снижение термического расширения бетонов с ростом содержания в базальте стекла составляет до 1,2–1,8 раза. Термическое расширение бетонов на заполнителях с размерами кристаллов минералов 0,1 см в 1,2–3,4 раза больше, чем на заполнителях с размерами кристаллов минералов 0,001 см.

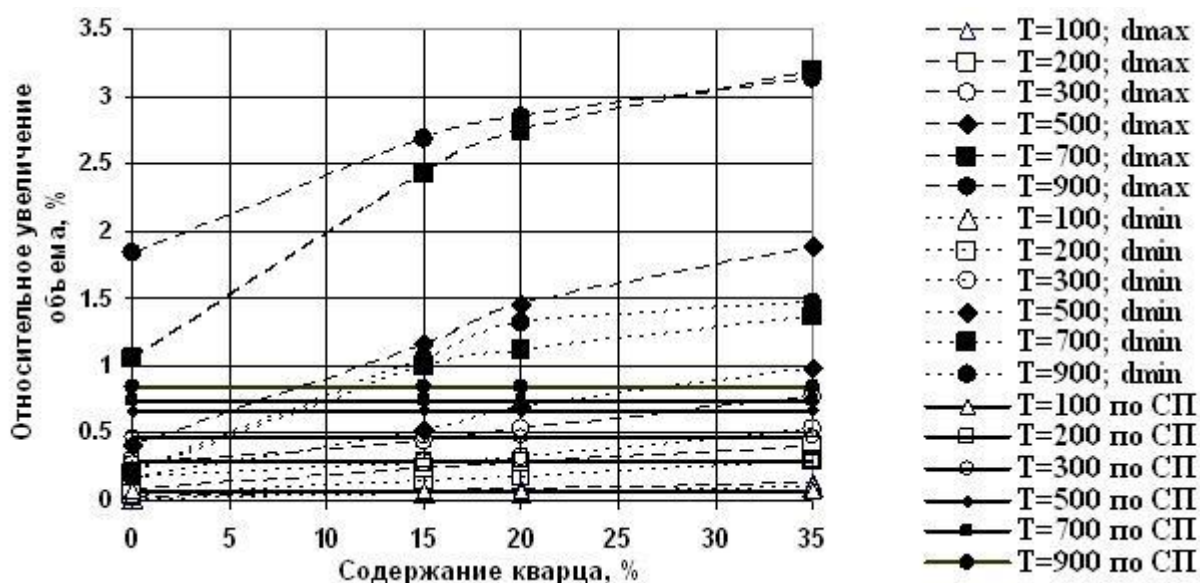


**Рис. 7. Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из базальтов и диабазов при различных температурах нагревания от содержания пироксенов (а) и стекла (б) в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{max}=0,1$  см и  $d_{min}=0,001$  см по результатам расчетов. Условные обозначения, пояснения и привязка к температурам приведены на рис. 5.**

Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из боя глиняного кирпича при различных температурах нагревания от содержания кварца (от 0 до 35%) и содержания стекла (от 30% до 60%) в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{max}=0,03$  см и  $d_{min}=0,0001$  представлены на рис. 8, 8,а, 8,б, 9,а, 9,б. Видно, что объемное термическое расширение бетонов на бое глиняного кирпича увеличивается с ростом в нем содержания кварца. Увеличение термического расширения бетонов с ростом содержания в заполнителе кварца составляет до 1,7–6,5 раз. С ростом содержания стекла объемное термическое расширение бетонов наоборот уменьшается. Снижение термического расширения бетонов с ростом содержания в бое глиняного кирпича стекла составляет до 1,1–2,0 раза. Термическое расширение бетонов на заполнителях с размерами кристаллов минералов 0,03 см в 1,2–8 раза больше (чем больше температура, тем больше), чем на заполнителях с размерами кристаллов 0,0001 см.



Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из шамота при различных температурах нагревания от содержания кварца (0 до 5%) и кристобалита (от 0 до 5%) в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{\max} = 0,03$  см и  $d_{\min} = 0,001$  см по результатам расчетов представлены на рис. 10. Видно, что объемное термическое расширение бетонов на шамоте увеличивается с ростом в нем содержания кварца и кристобалита. Увеличение термического расширения бетонов с ростом содержания в заполнителе кварца и кристобалита составляет до 3-10 раз. Термическое расширение бетонов на заполнителях из материалов с размерами кристаллов минералов 0,03 см в 1,1–1,5 раза больше (чем выше температура, тем больше), чем на заполнителях из материалов с размерами кристаллов минералов 0,001 см.



**Рис. 8. Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из глиняного кирпича при различных температурах нагревания  $T$  (в °C) от содержания кварца в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{\max}=0,03$  см и  $d_{\min}=0,0001$  см по результатам расчетов.**  
 Для сравнения приведены изменения объема, вычисленные по коэффициентам линейной температурной деформации, представленным в СП 27.13330.2017, как независимые по СП от содержания исследуемого минерала.

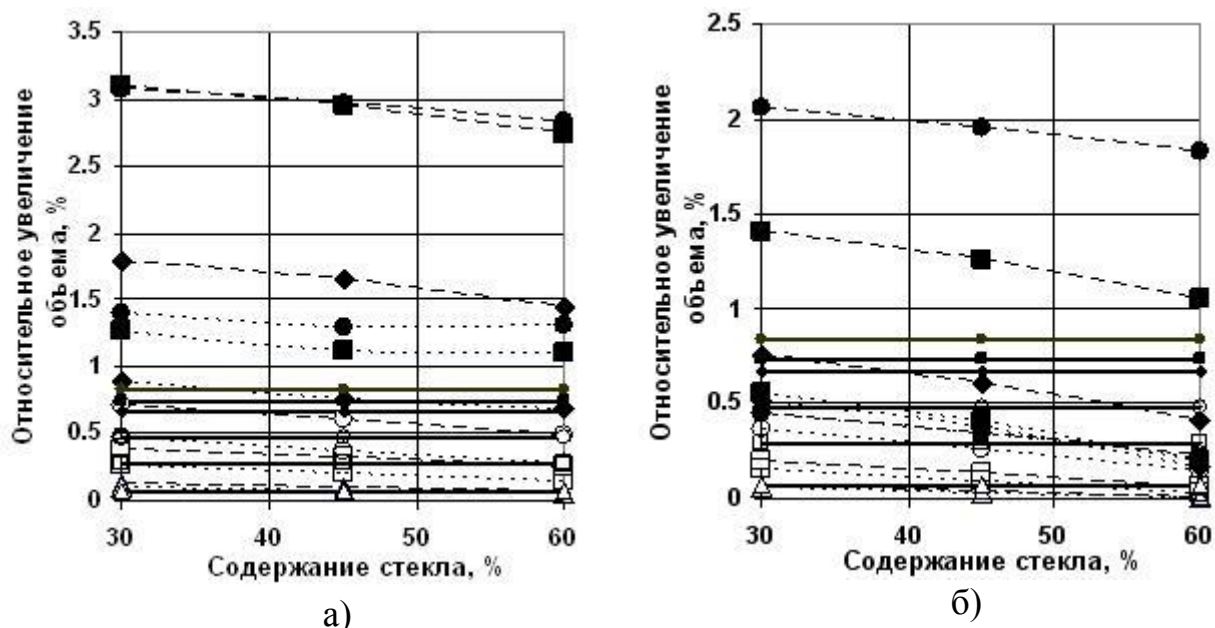


Рис. 9. Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из боя глиняного кирпича, содержащего 20-30% кварца (а) и без кварца (б) при различных температурах нагревания  $T$  от содержания стекла в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{max}=0,03$  см и  $d_{min}=0,0001$  см по результатам расчетов.

Условные обозначения, пояснения и привязка к температурам приведены на рис. 8.

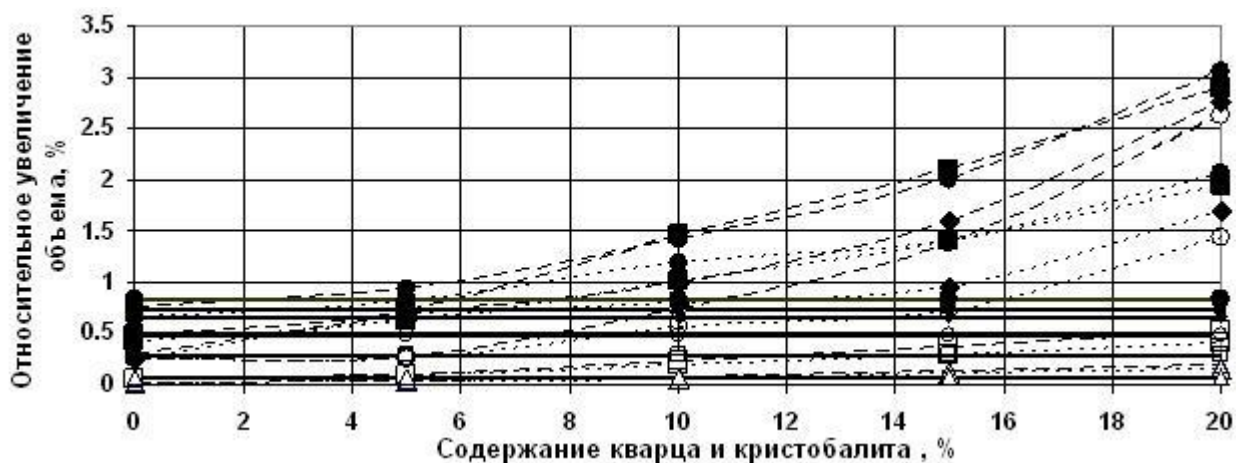
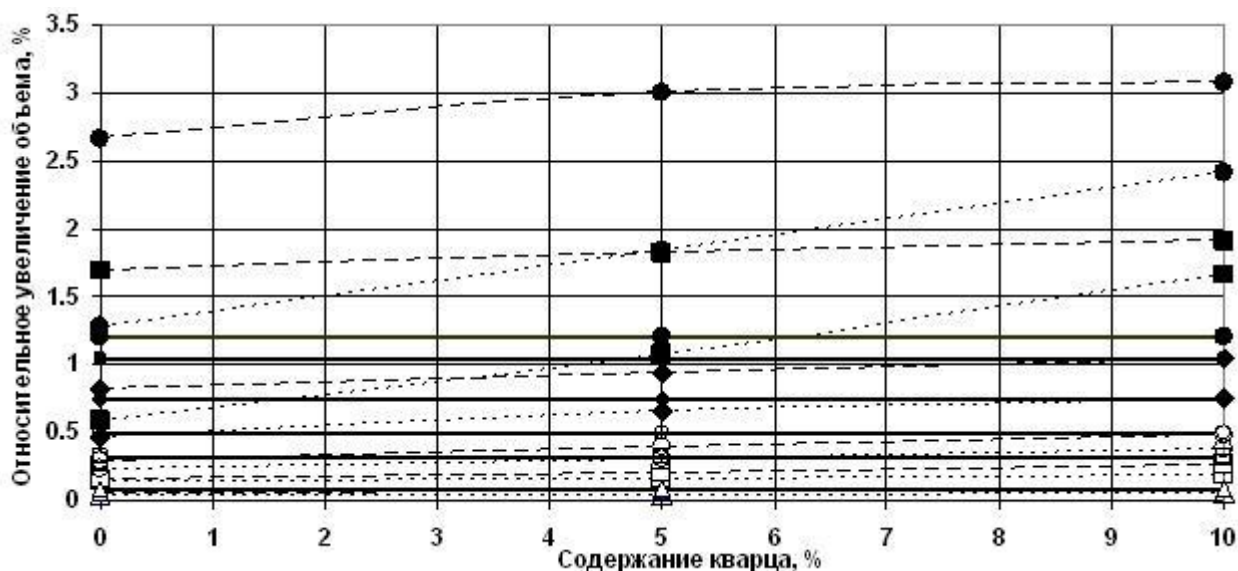


Рис. 10. Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из шамота при различных температурах нагревания от содержания кварца (0%, 5%, 5%, 5%, 5%) + кристобалита (0%, 0%, 5%, 10%, 15%) в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{max}=0,03$  см и  $d_{min}=0,001$  см по результатам расчетов.

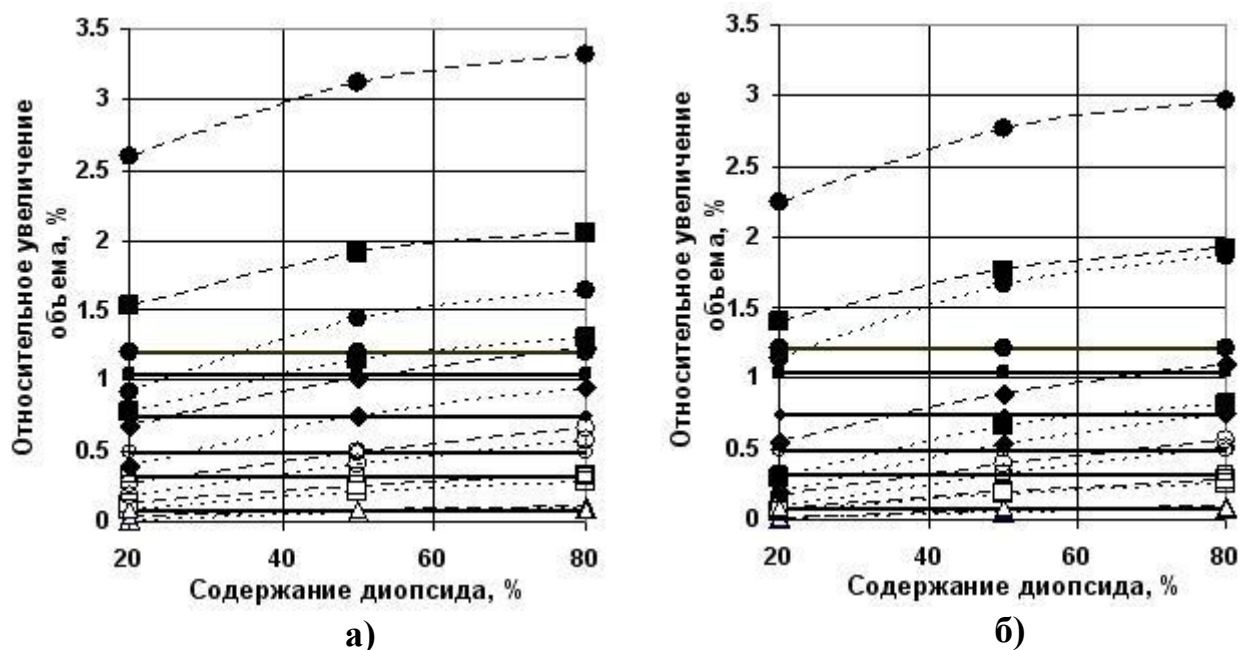
Условные обозначения, пояснения и привязка к температурам приведены на рис. 8.

Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из низкокальциевого шлака при различных температурах нагрева от содержания кварца (от 0 до 10%), пироксена-диопсида (от 20% до 80%) и стекла (от 20% до 80%) в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{\max}=0,03$  см и  $d_{\min}=0,003$  см по результатам расчетов представлены на рис. 11, 12,а, 12,б, и 13,а. Видно, что объемное термическое расширение бетонов на низкокальциевом шлаке увеличивается с ростом в нем содержания кварца и диопсида. Увеличение термического расширения бетонов с ростом содержания в заполнителе кварца составляет до 1,2–1,7 раз, диопсида – до 1,3–5 раз. С ростом содержания стекла объемное термическое расширение бетонов уменьшается. Снижение термического расширения бетонов с ростом содержания в низкокальциевом шлаке стекла составляет до 2,4–7,5 и более (до отрицательных величин). Термическое расширение бетонов на заполнителях с размерами кристаллов минералов 0,03 см в 1,1–5 раза больше, чем на заполнителях с размерами кристаллов 0,003 см.



**Рис. 11. Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из низкокальциевого шлака при различных температурах нагрева от содержания кварца в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{\max}=0,03$  см и  $d_{\min}=0,003$  см по результатам расчетов.**

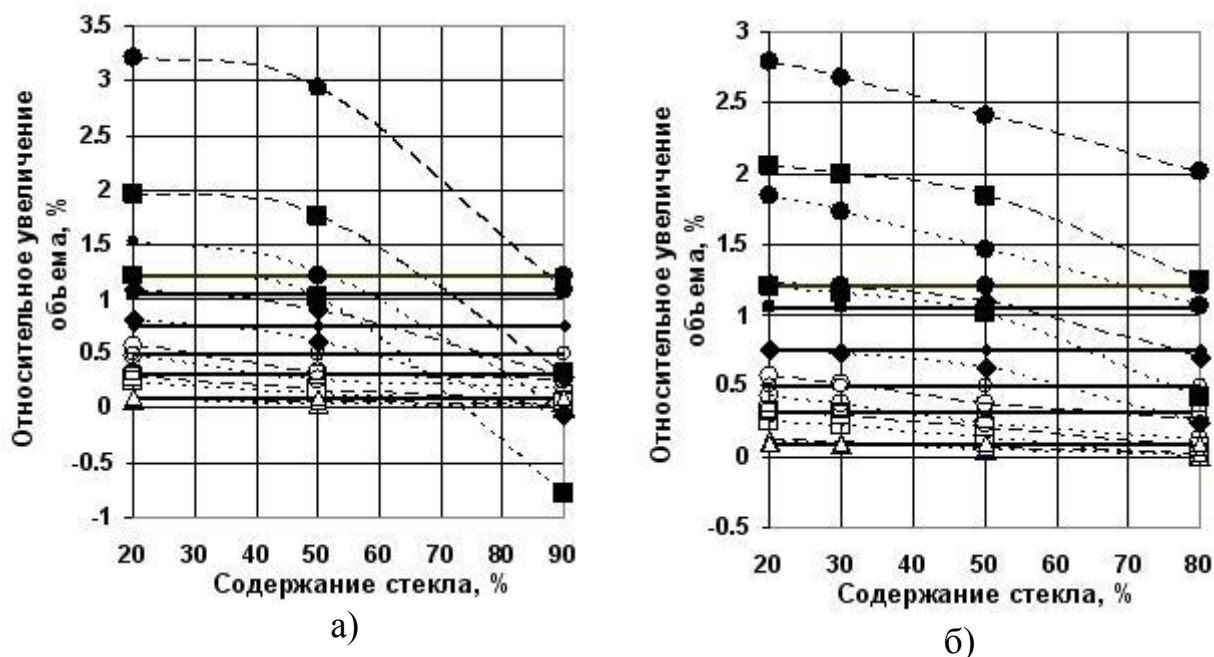
Условные обозначения, пояснения и привязка к температурам приведены на рис. 8.



**Рис. 12. Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из низкокальцевого шлака при различных температурах нагрева от содержания диопсида в заполнителях с 5% кварца (а) и без кварца (б) со средним размером кристаллов минералов  $d_{max}=0,03$  см и  $d_{min}=0,003$  см по результатам расчетов.**

Условные обозначения, пояснения и привязка к температурам приведены на рис. 8.

Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из высококальцевого шлака при различных температурах нагрева от содержания стекла (от 20% до 80%) в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{max}=0,03$  см и  $d_{min}=0,003$  см по результатам расчетов представлены на рис. 13,б. Видно, что объемное термическое расширение бетонов на высококальцевом шлаке уменьшается с ростом в нем содержания стекла. Снижение термического расширения бетонов с ростом содержания стекла составляет до 1,3–20 и более (до отрицательных величин). Термическое расширение бетонов на заполнителях из материалов с размерами кристаллов минералов 0,03 см в 1,2–4 раза больше, чем на заполнителях из материалов с размерами кристаллов минералов 0,003 см.



**Рис. 13. Зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из низкокальциевого шлака (а) и высококальциевого шлака (б) при различных температурах нагрева от содержания стекла в заполнителях со средним размером кристаллов минералов  $d_{max}=0,03$  см и  $d_{min}=0,003$  см по результатам расчетов.**

Условные обозначения, пояснения и привязка к температурам приведены на рис. 8.

Таким образом, для снижения термического расширения бетонов на каждом виде заполнителей, рекомендуемых СП 27.13330.2017, в качестве заполнителей следует использовать материалы со следующими особенностями минерального состава:

- известняки и доломиты, не содержащие арагонита и с минимальным содержанием кальцита и кварца;
- граниты и гранодиориты с минимальным содержанием кварца и микроклина или ортоклаза;
- диориты не содержащие кварц;
- андезиты, не содержащие кварц и с максимальным содержанием стекла;
- базальты и диабазы с минимальным содержанием пироксенов и с максимальным содержанием стекла;



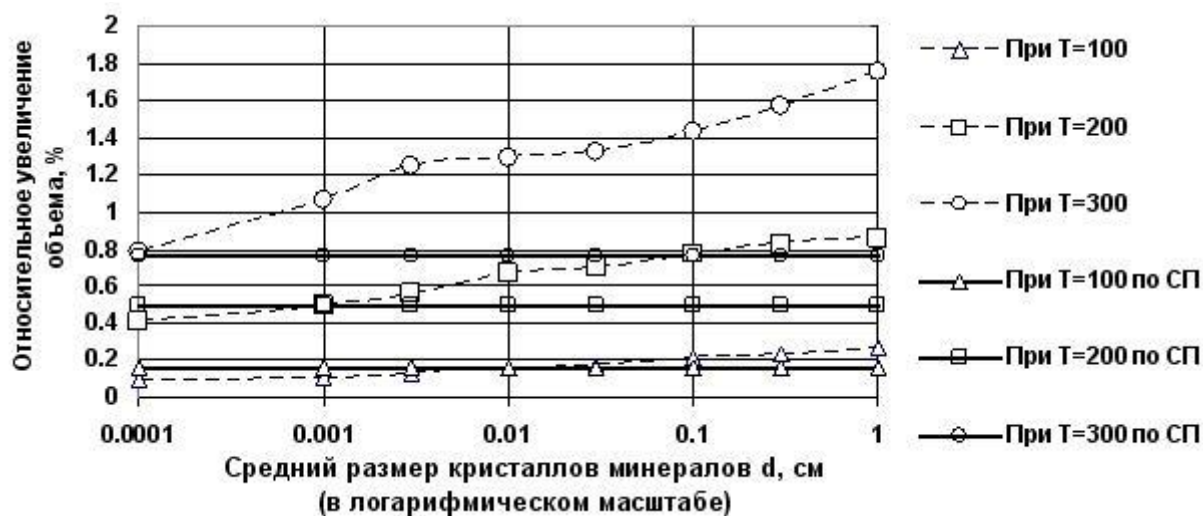
- бой из глиняного кирпича с минимальным содержанием кварца и максимальным содержанием стекла;
- шамот с минимальным содержанием стекла и кристобалита;
- низкокальциевые шлаки с минимальным содержанием кварца и пироксена-диопсида, с максимальным содержанием стекла;
- высококальциевые шлаки с максимальным содержанием стекла.

Влияние среднего размера кристаллов минералов, входящих в состав заполнителей, уже было показано на рис. 2–13 и описано выше в виде сравнения термического увеличения объема бетонов на заполнителях с максимальным и минимальным средним размером кристаллов минералов. Установлено, что термическое расширение бетонов на заполнителях с более крупным размером кристаллов существенно выше, чем с более мелким размером кристаллов.

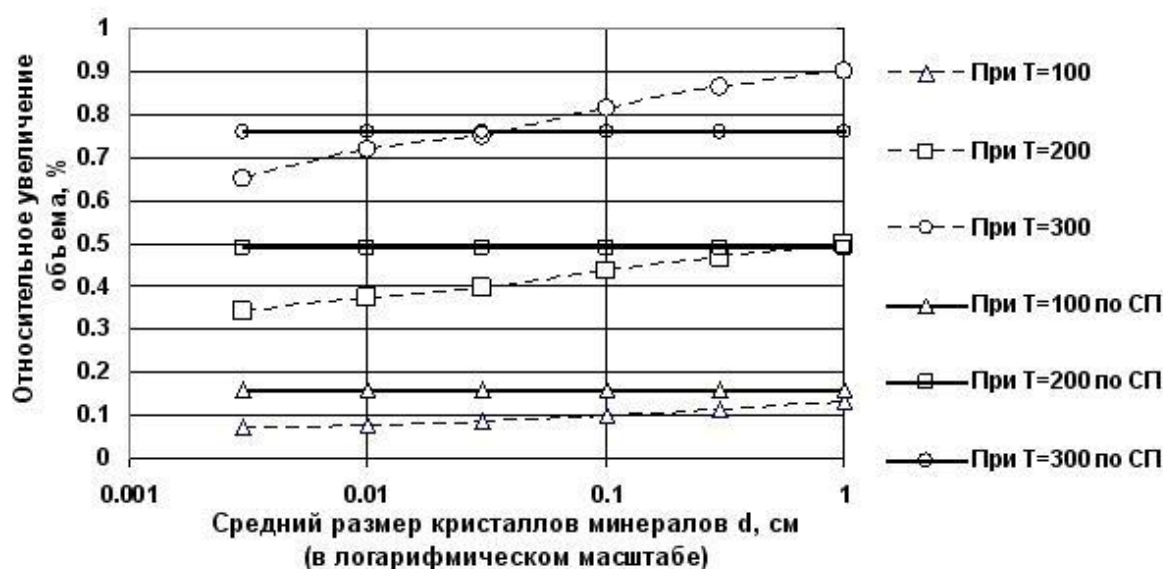
Более детальная зависимость термических изменений объема бетонов на заполнителях из известняков, гранитов и базальтов при различных температурах нагрева от среднего размера кристаллов минералов в диапазоне их значений от 0,0001 см до 1 см приведены на рис. 14–16.

Видно, что с ростом величины среднего размера кристаллов минералов, входящих в состав заполнителей, термическое увеличение объема бетонов возрастает. Причем в среднем при увеличении (уменьшении) среднего размера кристаллов минералов в 10 раз термическое расширение возрастает (снижается) на 27–45 % у известняков, на 16–32% - у гранитов и на 11–42% - у базальтов, то есть в целом от 11% до 45%.

Таким образом, из полученных данных следует, что для снижения термического расширения бетонов на каждом виде заполнителей, рекомендуемых СП 27.13330.2017, следует использовать материалы с минимальным средним размером кристаллов минералов.

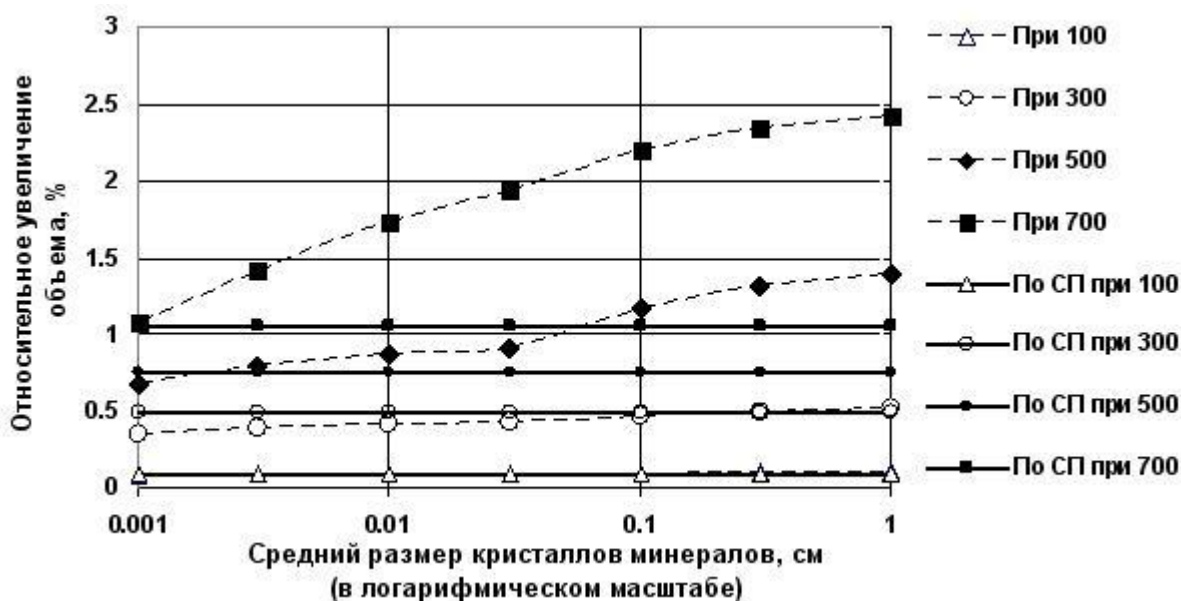


**Рис. 14. Зависимость термических изменений объема при различных температурах  $T$  (в °С) бетонов на заполнителях из известняков от средних размеров кристаллов минералов  $d$  при следующем минеральном составе: арагонит – 25%, кальцит – 50%, доломит – 25% по результатам расчетов. Для сравнения приведены изменения объема, вычисленные по коэффициентам линейной температурной деформации, представленным в СП 27.13330.2017, как независимые по СП от размера кристаллов минералов.**



**Рис. 15. Зависимость термических изменений объема в при различных температурах  $T$  (в °С) бетонов на заполнителях из гранитов от средних размеров кристаллов минералов  $d$  при следующем минеральном составе: кварц – 25%; микроклин – 40%; олигоклаз – 25%; роговая обманка-10% по результатам расчетов.**

Пояснения приведены на рис. 14.



**Рис. 16. Зависимость термических изменений объема при различных температурах нагревания  $T$  (в  $^{\circ}\text{C}$ ) бетонов на заполнителях из базальта и диабазов от средних размеров кристаллов минералов  $d$  при следующем минеральном составе: оливин – 5%, лабрадор – 45%, энстатит – 40%, кварцевое стекло – 10% по результатам расчетов.**

Пояснения приведены на рис. 14.

На всех рисунках, представленных в настоящей работе для сравнения, для каждой из температур нагревания приведены термические изменения объема бетонов, вычисленные по коэффициентам линейной температурной деформации, представленным в СП 27.13330.2017. Эти значения приведены одинаковыми при всех параметрах минерального состава и структуры, так как СП 27.13330.2017 влияние этих факторов не учитывает.

Из рисунков настоящей работы следует, что значения термического изменения объема бетонов по СП 27.13330.2017 совпадают с расчетными значениями только при определенных сочетаниях минерального состава и структуры заполнителей. В остальных случаях термические изменения объема по СП 27.13330.2017 отличаются от расчетных значений. Причем наблюдается отклонения, как в большую, так и в меньшую сторону. Поэтому, в зависимости от особенностей минерального состава и структуры, а также



их соотношения, реальное термическое расширение бетонов может быть и меньше и больше значений по СП 27.13330.2017.

Полученные в работе закономерности необходимо учитывать при выборе заполнителей бетонов, работающих при повышенных и высоких температурах, в том числе при рассмотрении радиационно-теплового экрана реактора АЭС, например в работах [15, 16].

### Заключение

1. Выполненные расчетные исследования подтвердили важность учета минерального состава и структуры заполнителей при выборе бетонов по их заполнителю в процессе проектировании конструкций, эксплуатируемых при повышенных и высоких температурах, по СП 27.13330.2017.

2. На основании расчетов установлено, что термическое расширение бетонов на портландцементе увеличивается при изменении минерального состава заполнителей следующим образом:

- у бетонов на известняках и доломитах - с увеличением содержания в заполнителях минералов кальцита, кварца и особенно арагонита;

- у бетонов на гранитах, гранодиоритах и сиенитах - с увеличением содержания в заполнителях минералов кварца и калиевых полевых (микроклина и ортоклаза);

- у бетонов на диоритах и андезитах - с увеличением содержания в заполнителях минерала кварца и с уменьшением содержания стекла;

- у бетонов на базальтах и диабазах - с увеличением содержания в заполнителях минерала пироксенов и с уменьшением содержания стекла;

- у бетонов на бое глиняного кирпича - с увеличением содержания в заполнителях минерала кварца и с уменьшением содержания стекла;

- у бетонов на шамоте - с увеличением содержания в заполнителях минерала кварца и кристобалита и с уменьшением содержания стекла;

- у бетонов на низкокальциевом шлаке - с увеличением содержания в заполнителях минералов кварца, пироксена-диопсида и с уменьшением содержания стекла;

- у бетонов на высококальциевом шлаке - с уменьшением содержания стекла.

- у бетонов на всех заполнителях – с увеличением среднего размера кристаллов минералов.

5. Установлено, что значения термического изменения объема бетонов, вычисленные по СП 27.13330.2017, совпадают с расчетными значениями только при определенных сочетаниях минерального состава и структуры заполнителей. В остальных случаях реальное термическое расширение бетонов может быть и меньше, и больше значений, полученных по СП 27.13330.2017. Причем наблюдаются отклонения, как в большую, так и в меньшую сторону. Поэтому в зависимости от особенностей минерального состава и структуры, а также их соотношения реальное термическое расширение бетонов может быть и меньше и больше значений по СП 27.13330.2017.

6. Определено, что для снижения термического расширения бетонов на каждом виде заполнителей, рекомендуемых СП 27.13330.2017, в качестве заполнителей следует использовать материалы со следующими особенностями минерального состава и структуры:

- известняки и доломиты, не содержащие арагонита и с минимальным содержанием кальцита и кварца;

- граниты и гранодиориты с минимальным содержанием кварца и микроклина или ортоклаза;

- диориты, не содержащие кварц;

- андезиты, не содержащие кварц и с максимальным содержанием стекла;

---

- базальты и диабазы с минимальным содержанием пироксенов и с максимальным содержанием стекла;
- бой из глиняного кирпича с минимальным содержанием кварца и максимальным содержанием стекла;
- шамот с минимальным содержанием стекла и кристобалита;
- низкокальциевые шлаки с минимальным содержанием кварца и пироксена-диопсида, с максимальным содержанием стекла;
- высококальциевые шлаки с максимальным содержанием стекла;
- все рассмотренные материалы с минимальным средним размером кристаллов минералов.

7. Так как термическое расширение бетонов определяется, прежде всего, термическим расширением заполнителей, то обнаруженные закономерности, полученные на портландцементных бетонах, будут справедливы и для бетонов на других вяжущих веществах.

### Литература

1. Некрасов К. Д. Жароупорный бетон. М.: Промстройиздат, 1957. 283 с.
2. Жуков В.В., Цикунов В.С., Хаджишалапов Г.Н., Магомедов А.Д. Жаростойкий бетон и тяжелый бетон для повышенных температур в реакторостроении. Махачкала: Новый день, 2002. 151 с.
3. Zhi Xing, Beaucour Anne-Lise, Hebert Ronan, Noumowe Albert, Ledesert Béatrice Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature. Cement and Concrete Research. Vol. 41, Issue 4, April 2011, P. 392-402.
4. Дмитриев А. П., Кузьяев Л. С., Протасов Ю. И., Ямщиков В. С. Физические свойства горных пород при высоких температурах. М: Недра, 1969. 160 с.

5. R. Niry R, Beaucour A.-L., Hebert R., Noumowé A., Ledésert B., Bodet R. Thermal stability of different siliceous and calcareous aggregates subjected to high temperature. MATEC Web of Conferences 6, 07001 (2013). DOI: 10.1051/matecconf/20130607001

6. Razafinjato, Rijaniaina Niry, Beaucour Anne-Lise, Hebert Ronan L., Ledesert Béatrice, Bodet Raphaël, Noumowe Albert. High temperature behaviour of a wide petrographic range of siliceous and calcareous aggregates for concretes. Construction and Building Materials. Vol. 123. 1 October 2016, P. 261 -273.

7. Денисов А. В. Радиационные изменения заполнителей тяжелых бетонов и метод их аналитического определения: дисс... канд. техн. наук. 05.23.05. М., 1987. 276 с.

8. Музалевский Л.П. Радиационные изменения тяжелых бетонов и метод их аналитического определения: дисс... канд. техн. наук. 05.23.05. М., 1989. 240 с.

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

10. Denisov A.V., Sprince A. Analytical determination of thermal expansion of rocks and concrete aggregates. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 4(80). P. 151–170. doi: 10.18720/MCE.80.14.

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

12. Rrchar J. Reeder, Steven F. Markgraf. High-temperature crystal chemistry of dolomite. American Mineralogist, 1986. Vol. 71. P. 795-804.

13. Некрасов, К.Д., Жуков, В.В., Гуляева, В.Ф. Тяжелый бетон в условиях высоких температур. М.: Стройиздат, 1972. 128 с.

14. Шейкин А. Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня. М.: Стройиздат, 1974. 192 с.

---



15. Агаханов Э.К., Курачев Р.М., Чепурненко А.С., Кулинич И.И. Нелинейная задача теплопроводности для радиационно-теплового экрана реактора АЭС. Инженерный Вестник Дона: электронный журнал. 2015. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3417](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3417).

16. Агаханов Э.К., Курачев Р.М. Напряженно-деформированное состояние радиационно-теплового экрана реактора АЭС. Инженерный Вестник Дона: электронный журнал. 2018. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5215](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5215).

### References

1. Nekrasov K. D. Zharoupornyy beton. [Heat-resistant concrete.]. Moskva: Promstroyizdat, 1957. 283 p.

2. Zhukov V.V., Tsikunov B.C., Khadzhishalapov G.N., Magomedov A.D. Zharostoykiy beton i tyazhelyy beton dlya povyshennykh temperatur v reaktorostroenii. [Heat-resistant concrete and heavy concrete for elevated temperatures in reactor construction]. Makhachkala: Novyy den, 2002. 151 p.

3. Zhi Xing, Beaucour Anne-Lise, Hebert Ronan, Noumowe Albert, Ledesert Béatrice Cement and Concrete Research. Vol. 41, Issue 4, April 2011, pp. 392-402.

4. Dmitriyev A. P., Kuzyayev L. S., Protasov Yu. I., Yumshchikov V. S. Fizicheskiye svoystva gornyh porod pri vysokih temperaturah. [Physical properties of rocks at high temperatures]. Moskva: Nedra, 1969. 160 p.

5. R. Niry R, Beaucour A.-L., Hebert R., Noumowé A., Ledésert B., Bodet R. MATEC Web of Conferences 6, 07001 (2013). doi: 10.1051/matecconf/20130607001.

6. Razafinjato, Rijaniaina Niry, Beaucour Anne-Lise, Hebert Ronan L., Ledesert Béatrice, Bodet Raphaël, Noumowe Albert. Construction and Building Materials. Vol. 123. 1 October 2016, pp. 261 -273.

7. Denisov A. V. Radiatsionnye izmeneniya zapolniteley tyazhelyh betonov i metod ih analiticheskogo opredeleniya.[Radiation-induced alteration of aggregates of heavy concretes, and method for their analytical determination]. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Candidate of technical sciences (PhD) dissertation].05.23.05. Moskva, 1987. 276 p.

8. Muzalevskiy L.P. Radiatsionnye izmeneniya tyazhelyh betonov i metod ih analiticheskogo opredeleniya [Radiating changes of heavy concrete and method of their analytical definition]. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk.[Candidate of technical sciences (PhD) dissertation]. 05.23.05. Moskva, 1989. 240 p.

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

10. Denisov A.V., Sprince A. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 4(80). P. 151–170. doi: 10.18720/MCE.80.14.

11. Spravochnik fizicheskikh konstant gornykh porod [Handbook of physical constants of rocks]. Pod obshchey redaktsiyey S. Klarka ml. Translation from English. Moskva: Mir, 1969. 544 p.

12. Rrchard J. Reeder, Steven F. Markgraf. American Mineralogist, 1986. Vol. 71. pp. 795-804.

13. Nekrasov, K.D., Zhukov, V.V., Gulyaeva, V.F. Tyazhelyy beton v usloviyakh vysokikh temperatur. [Heavy concrete at high temperatures]. Moskva: Stroyizdat, 1972. 128 p.

14. Sheykin A. E. Struktura, prochnost` i treshchinostoykost` tsementnogo kamnya. [Structure, strength and fracture toughness of cement stone.] Moskva: Stroyizdat, 1974. 192 p.



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

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