

УДК 620.191.33:666.974.2

DOI: 10.35211/1990-5297-2025-6-301-47-51

*Р. А. Бурханова, Т. К. Акчурин, О. В. Душко, В. Г. Поляков***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ И ПОРИСТОСТИ
ЖАРОСТОЙКИХ БЕТОНОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: burkhanov@inbox.ru, smist2012-2013@yandex.ru, dushko@vgasu.ru

strf.vgasu@yandex.ru

В статье приведены результаты исследования распределения объемов твердой фазы и порового пространства в цементном камне и бетоне в зависимости от В/Ц, полученные с помощью разработанного авторами метода оценки распределения пор по их размерам. Представлен расчетно-экспериментальный метод определения пористости жаростойких бетонов в зависимости от температуры нагрева.

Ключевые слова: жаростойкий бетон, структура, пористость, температура, нагрев

*R. A. Burkhanova, T. K. Akchurin, O. V. Dushko, V. G. Polyakov***DETERMINATION OF STRUCTURE AND POROSITY PARAMETERS
OF HEAT-RESISTANT CONCRETE DEPENDING ON HEATING TEMPERATURE****Volgograd State Technical University**

The article presents the results of the study of the distribution of solid phase volumes and pore space in cement stone and concrete depending on W/C, obtained using the method developed by the authors for assessing the distribution of pores by their sizes. A calculation and experimental method for determining the porosity of heat-resistant concretes depending on the heating temperature is presented.

Keywords: heat-resistant concrete, structure, porosity, temperature, heating

Введение

Структура бетона, определяющая его трещиностойкость и долговечность при нормальной и высоких температурах, в значительной степени неоднородна и включает в себя твердую фазу (гидратные новообразования, негидратированный цемент, микронаполнитель, мелкий и крупный заполнители), поровое пространство (глеевые и капиллярные поры, поры воздухововлечения), а также микротрещины [1].

Основным компонентом затвердевшего портландцементного камня являются гидросиликаты кальция группы тоберморита – цементный гель слоисто-волокнистого строения, содержание которого примерно составляет до 75 % от объема твердой фазы; до 15–20 % занимает $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и остальной объем приходится на другие гидратные соединения [2]. Стехиометрический подсчет показывает, что C_3S и C_2S в процессе гидратации связывают примерно одинаковое количество воды, но при этом C_2S образует в 2 раза меньше $\text{Ca}(\text{OH})_2$, чем C_3S и примерно на 25 % больше гелевой составляющей. В то же время одна часть C_4AF связывает 0,31 часть $\text{Ca}(\text{OH})_2$ что имеет важное значение в технологии получения жаростойких бетонов

на портландцементном вяжущем. Количество микронаполнителя, необходимое для связывания $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при нагревании в зависимости от минералогического состава цемента определяется расчетным путем. В [3] показано, что оптимальным минералогическим составом жаростойкого цемента может быть двуминеральный клинкер, состоящий из C_3S и C_4AF . Это возможно за счет того, что C_3S имеет высокую прочность до нагрева, значительно превышающую прочность других клинкерных материалов, а C_4AF , не снижая значительно прочность, при нагревании в смеси с микронаполнителями не дает усадки, что важно, поскольку усадка цементного камня является одной из причин снижения прочности жаростойкого бетона.

Материалы и методы исследования

Авторами было проведено исследование структуры бетонов на основе данных сорбционных измерений по парам воды с последующим определением удельной поверхности усовершенствованным методом капиллярной конденсации [4]. Он позволяет получить полную информацию об объеме порового пространства в материале, а также существенно уточнить ее в диапазоне размеров пор до 10^{-7} м .

В работе были исследованы жаростойкие бетоны на портландцементе, на глиноземистом цементе и обычный бетон. Также определялись сорбционные свойства модифицированного жаростойкого бетона на жидком стекле и шлаковых заполнителях, с тонкомолотой шлаковой добавкой Волжского трубного завода (ОАО «ВТЗ»). Выявлялись особенности изменения сорбционных свойств указанных видов бетонов в результате высокотемпературного нагрева.

Принятый для исследований бетон предварительно нагревали до температур 105, 300 и 800 °С. Скорость подъема температуры была задана 100 °С в час, выдержка при заданной температуре 72 часа, охлаждение со скоростью 40 °С в час. Использовались две серии навесок

по 30 – 50 г. Одна серия предназначалась для получения данных адсорбции, другая – десорбции. Точку на кривых десорбции ($P/P_s = 0,98$) получали после предварительного насыщения бетона водой под вакуумом.

Сушку образцов для получения исходной точки на кривой адсорбции для бетона не подвергавшегося нагреванию, а также определение равновесной влажности (количество испаряемой влаги) при всех принятых значениях (P/P_s) вели «Д»-методом (рис. 1), за счет разности давлений и температур в эксикаторе и окружающей среде. Охлаждение ловушки – влагоуловителя производилось над сухим льдом при температуре – 79 °С (давление паров воды в эксикаторе над образцами 5,10 мм.рт.ст.).

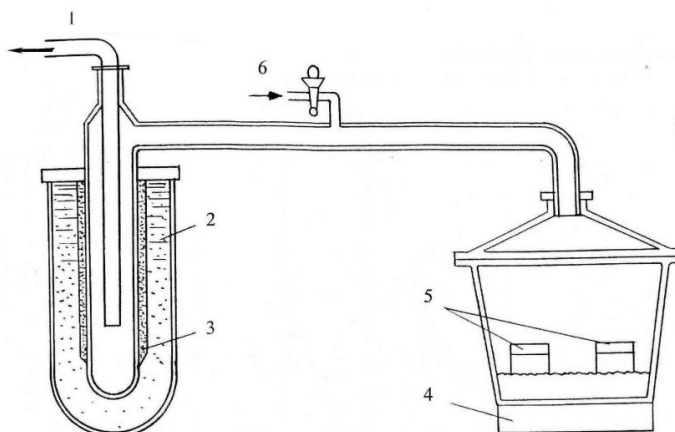


Рис. 1. Схема установки для сушки образцов:

1 – к насосу; 2 – сухой лед со спиртом; 3 – изоляция; 4 – эксикатор; 5 – образцы; для выпуска воздуха

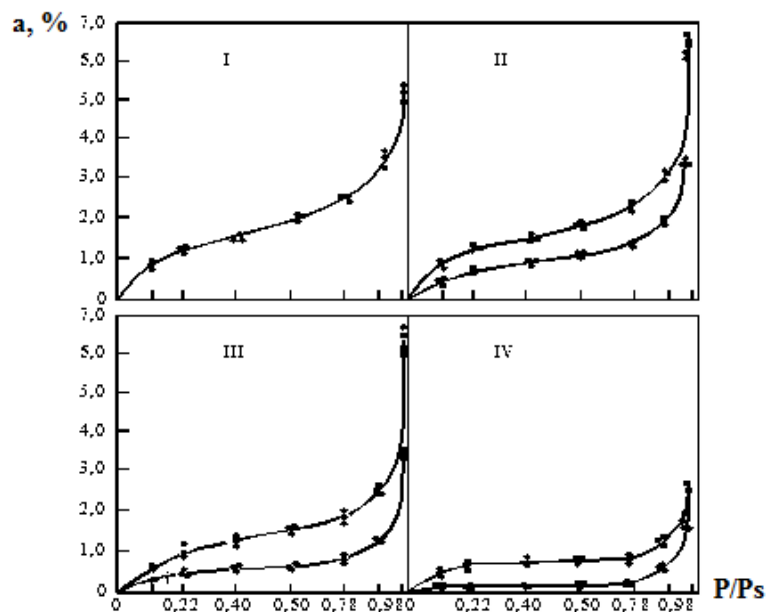


Рис. 2:

I – изотерма десорбции жаростойкого бетона на портландцементе, не подвергавшегося нагреванию;
 II – изотермы адсорбции и десорбции после нагрева при температуре 105 °С;
 III – изотермы адсорбции и десорбции после нагрева при температуре 300 °С;
 IV – изотермы адсорбции и десорбции после нагрева при температуре 800 °С

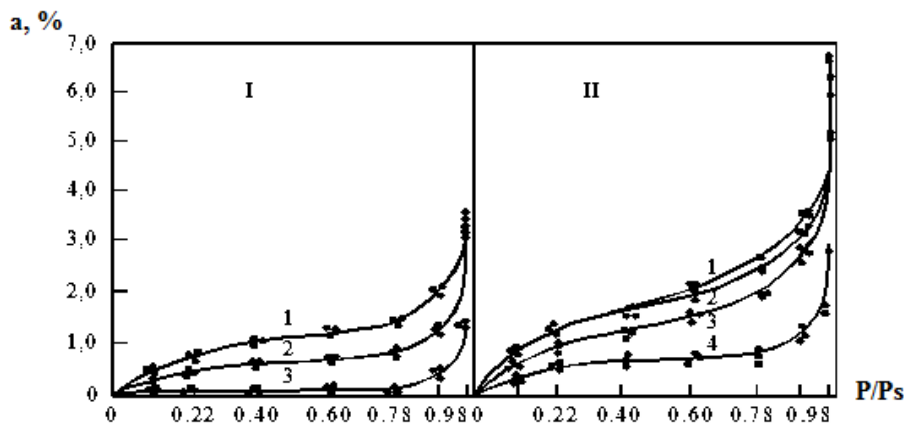


Рис. 3. Влияние нагрева на изменение сорбционных свойств жаростойкого бетона на портландцементе:

I – адсорбция: 1, 2, 3 – после нагрева при температуре 105, 300, 800 °C;

II – десорбция: 1 – бетон не подвергался нагреванию, 2, 3, 4 – после нагрева при температуре 105, 300, 800 °C

Изотермы сорбции паров воды были получены по равновесной влажности бетона над насыщенными растворами солей (рис. 2, 3). Температура в камерах поддерживалась постоянной (20°C), контроль влажности вели датчиками влажности и одновременно по температуре сухого и мокрого термометра.

По результатам исследований сорбционные характеристики жаростойких бетонов на жидком стекле на шлаковых заполнителях, на портландцементе, на глиноземистом цементе и обычного бетона отличаются в зависимости от вида, состава и гигроскопических свойств входящих компонентов. Для изотерм адсорбции жаростойких и обычного бетонов, а также пористых заполнителей характерен гистерезис.

Удельную поверхность бетона получали по данным сорбционных измерений усовершенствованным методом капиллярной конденсации [4], основное уравнение для расчета удельной поверхности (S) капиллярно – пористых материалов имеет вид [3]:

$$S = \frac{a_m N}{M} \cdot A_m, \quad (1)$$

где a_m – емкость мономолекулярного слоя; M – молекулярная масса адсорбата; A_m – площадь, занимаемая молекулой адсорбата в заполненном монослое; N – число Авогадро.

Значение a_m – определяли из уравнения:

$$\frac{P/P_s}{a(1-P/P_s)} = \frac{1}{a_m C} + \frac{C-1}{a_m C} \cdot P/P_s, \quad (2)$$

где a – адсорбция при соответствующем относительном давлении P/P_s на единицу массы адсорбента (бетона); C – константа, связанная с теплотой адсорбции и температурой.

Распределение объемов пор в цементном камне и общая пористость бетона до нагревания определялись по известным формулам [5], которые дают близкие результаты, т.к. при их выводе приняты примерно одни и те же допущения, а именно: 1. При полной гидратации вяжущего количество не испаряемой при 105 °C воды $V_n/V_c = 0,25$; 2. Удельный объем не испаряемой воды составляет 75 %, а гелевой воды – 90 % от объема воды в свободном состоянии. 3. Масса воды, заключенной в цементном геле достигает 15 % от массы гидратированного цемента. 4. Водоотделения в процессе гидратации не происходит. Из этих положений следует, что при $V/V_c < 0,4$ полная гидратация не может произойти. Количественные показатели структуры цементного камня и бетона в зависимости от V/V_c приведены на рис. 4.

Расчетные значения количества не испаряемой воды в портландцементном камне, параметра a_m , пропорционального количеству не испаряемой воды в цементном камне, а также его удельной поверхности, определяли по формулам [4]. При этом для использованного портландцемента производства АО «Себряковцемент» марки 500, имеющего минералогический состав $C_3S = 64$ %; $C_2S = 12,0$ %; $C_3A = 4,29$ %; $C_4AF = 14,0$ % получено близкое совпадение с экспериментальными данными [4, 6].

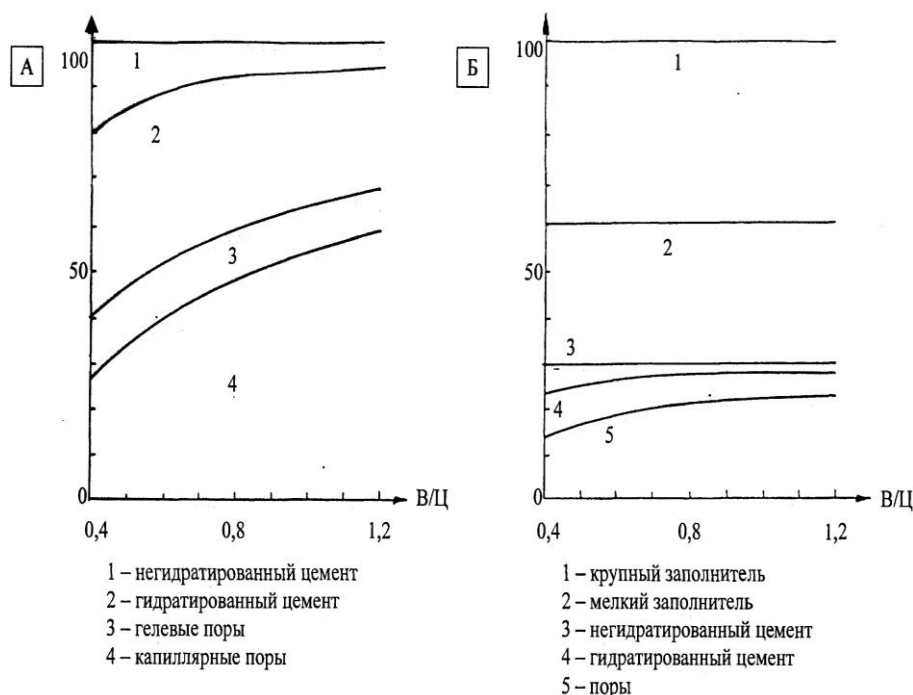


Рис. 4. Распределение объемов твердой фазы и порового пространства в цементном камне (А) и бетоне (Б) в зависимости от В/Ц

Результаты исследований и их обсуждение

Таким образом, авторами установлено влияние условий твердения на взаимосвязь «степень гидратации – пористость» цементного камня в зависимости от В/Ц. Согласно экспериментальным данным степень гидратации α является функцией В/Ц:

$$\alpha = k(B / Ц)^{1/4}, \quad (3)$$

а также связана с общей и капиллярной пористостью уравнениями:

$$\alpha = k(\Pi_{\text{общ}})^{1/2}, \quad (4)$$

$$\alpha = k(\Pi_{\text{кап}})^{1/4}, \quad (5)$$

где $k = 0,6-1,0$ в зависимости от вида, сроков и условий твердения цемента.

Для того, чтобы учесть влияние нагрева на изменение сорбционных свойств бетонов необходимо знать соответствующее изменение их общей пористости Π'_o . Для этого при расчете Π'_o по формуле:

$$\Pi'_o = \frac{C}{10}(W / C - 0,19\alpha) + Q, \quad (6)$$

где Q – объем пор воздухововлечения, необходимо знать степень дегидратации вяжущего в бетоне α^t и сделать поправку на величину усадки. Переход от линейной усадки ε_y^t к объемной

$$V_y^t = 1 - (1 - \varepsilon_y^t)^3. \quad (7)$$

Тогда формула (6) для определения пористости бетона с плотным заполнителем в зависимости от температуры нагрева принимает вид:

$$\Pi'_o = \Pi'_i 1 - (1 - \varepsilon_y^t)^3, \quad (8)$$

где Π'_i – пористость бетона, определенная по формуле (6), но с параметром α^t , соответствующим температуре нагрева бетона.

Пористость жаростойких бетонов, например, с пористым шамотным заполнителем можно определить по формуле:

$$\Pi'_o = \Pi'_{\text{цк}} \cdot V_{\text{цк}} + \Pi_3 \cdot V_3 + Q, \quad (9)$$

где $\Pi'_{\text{цк}}$ и Π_3 соответственно пористость цементного камня и заполнителя; $V_{\text{цк}}$ и V_3 – объемные части цементного камня и заполнителя.

Авторами была определена пористость жаростойкого бетона на портландцементе с шамотными заполнителями в зависимости от температуры его нагрева. Состав жаростойкого бетона на портландцементе в кг/м³: Ц = 436кг; Д=131кг; П+Щ=1233кг; В/Ц = 0,63; В_н/Ц=0,23; $\alpha = 0,92$.

Изменение относительной линейной усадки E_y^t , степени дегидратации цемента α^t и пористости бетона в зависимости от температуры приведены в таблице.

**Расчетные данные при определении пористости жаростойкого бетона
на портландцементе с шамотными заполнителями**

T, °C	α'	$(1 - E'_y)^3$	Π'_6 , % (расч.)	Π_6 , % (эксп.)
20	0,92	–	27,48	27,40
100	0,92	0,979	26,90	26,30
200	0,58	0,979	29,71	–
300	0,46	0,979	30,69	29,48
400	0,40	0,979	31,16	–
500	0,34	0,979	31,65	30,60
600	0,22	0,978	32,57	–
700	0,14	0,976	33,19	–
800	0,08	0,974	33,59	33,1
900	0,04	0,973	33,77	–

Для математической обработки экспериментальных данных на ПК использовали математический пакет Mathcad PLUS 6.0 и электронные таблицы Microsoft Excel. Сопоставление расчетных и экспериментально замеренных значений изменения пористости дает близкое совпадение. Наибольшее отклонение 4,5 %. При этом с увеличением пористости происходит уменьшение прочности бетона при нагреве.

Выводы

1. Нагрев бетонов приводит к снижению их сорбционного влагосодержания, особенно после 800 °C. Это позволяет количественно оценить структурные изменения, происходящие в бетоне в результате нагрева. В зависимости от вида и состава, удельная поверхность жаростойких бетонов до нагревания составляет 40–80 м²/г и существенно уменьшается при нагреве.

2. Нагрев бетонов при высоких температурах приводит к изменению их структуры. Происходит перераспределение объемов пор по их размерам за счет уменьшения объемов мелких пор и увеличение макро- и крупных пор, наблюдается увеличение среднего радиуса пор и изменение общей пористости бетона.

3. Разработанный расчетно-экспериментальный метод определения пористости бетонов в зависимости от температуры их нагрева дает

близкие значения с экспериментальными данными. Он прост, и может быть использован в дополнении к Пособию по технологии изготовления жаростойких бетонов СНиП 3.09.01–85 «Производство сборных железобетонных конструкций и изделий».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волженский, А. В. Минеральные вяжущие вещества. Технология и свойства / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников. – М. : Транспортная компания, 2023. – 476 с.
2. Мчедлов-Петросян, О. П. Химия неорганических строительных материалов / О. П. Мчедлов-Петросян. – М. : Стройиздат, 1988. – 304 с.
3. Некрасов, К. Д. Жароупорный бетон / К. Д. Некрасов. – М. : Промстройиздат, 1977. – 283 с.
4. Бурханова, Р. А. Определение интегральной и дифференциальной пористости жаростойких бетонов усовершенствованным методом конденсации / Р. А. Бурханова, Т. К. Акчурин, И. В. Стефаненко, О. В. Душко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (289) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 44–49.
5. Микульский, В. Г. Строительные материалы / В. Г. Микульский, Г. И. Горчаков, В. В. Козлов. – М. : АСВ, 2011. – С. 521.
6. Бурханова, Р. А. Взаимосвязь структуры, процессов тепломассопереноса и трещиностойкости жаростойких бетонов при их первом нагревании / Р. А. Бурханова, Т. К. Акчурин, В. Г. Поляков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (277) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»).