

Аниканова Т. В., канд. техн. наук, доц.,
Рахимбаев Ш. М., д-р техн. наук, проф.
Половнёва А. В., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ТВЕРДЕНИЯ ПОРОБЕТОНОВ

pogrom7@yandex.ru

Известно, что в Российской Федерации и странах ближнего зарубежья тепловая обработка изделий из тяжелого бетона обычно производится при температуре 80-90°C. При этом происходит большой перерасход топливно-энергетических ресурсов, так как при пропарке используется до 20% энергии, которая тратится на производство вяжущих.

В промышленно развитых странах в последние два десятилетия практикуется пропарка цементных бетонов при температуре 40°C, однако теоретическое обоснование и подробное исследование кинетики твердения при этой температуре отсутствует. В работах южно-африканских специалистов показано, что 40°C является оптимальной температурой тепловой обработки пенобетонов с плотностью 1100 кг/м³, что втрое больше, чем у исследованных нами составов. В связи с этим ниже излагаются результаты исследования влияния тепловой обработки на кинетику твердения пенобетона со средней плотностью 300 – 600 кг/м³.

Ключевые слова: тепловая обработка, средняя плотность, прочность пенобетона, кинетические константы.

Введение. В работе [1] показано, что решающее влияние на прочность поробетона оказывает удельная прочность матрицы. От прочности матрицы зависит величина соотношения

плотности к прочности ($\frac{\rho}{R}$): для пенобетона эта

величина составляет 500-800 при средней плотности 300-500 кг/м³, для пеностекла – 100-200 [2]. Для современного уровня прочности поробетона величина прочности матрицы составляет 20...25 МПа. Для ее повышения, особенно при пониженной средней плотности поробетона < 500 кг/м³, необходимо максимально увеличить количество и прочность коагуляционных и конденсационно-кристаллизационных фазовых контактов между взаимодействующими частицами исходной смеси в процессе структурообразования и твердения газобетона. При автоклавном твердении это достигается достаточно устойчиво и полно при использовании различных видов вяжущих и заполнителей, чему способствует повышенная температура, при которой резко ускоряется диффузионный массообмен, обеспечивающий возникновение большого количества хорошо закристаллизованных прочных фазовых контактов из низкоосновных гидросиликатов кальция и тоберморита между минеральными частицами вяжущих и заполнителей.

При неавтоклавном твердении для достижения аналогичных автоклавному качественных показателей поробетона приходится использовать в качестве основного вида вяжущего портландцемент, а в качестве заполнителей и наполнителей – вещества с повышенной поверхност-

ной активностью, обеспечивающие возникновение фазовых контактов между частицами вяжущих и заполнителей, но в меньшем количестве и менее прочных и закристаллизованных, чем при автоклавном твердении в начальные сроки. Однако в последующие сроки, в отличие от автоклавного, неавтоклавный поробетон продолжает набирать прочность за счёт образования новых контактов и повышения степени кристаллизации имеющихся связей. В результате прочность неавтоклавного поробетона может со временем оказаться выше автоклавного. Позитивная динамика изменения свойств неавтоклавного поробетона предопределяет повышенную надёжность и долговечность конструкций на его основе. Прочность неавтоклавного пенобетона со временем также увеличивается, но более медленно в связи с экранирующим действием пенообразователей и других ПАВ.

Основная часть. Воздействие на бетон повышенных начальных температур вызывает неблагоприятное влияние на длительную прочность бетона. Снижение прочности при этом обусловлено образованием микротрещин и других дефектов структуры камня, вызванных высоким градиентом температур при тепловой обработке [3]. Увеличение содержания воздушных пор и пустот в пенобетоне ограничивает вредное воздействие термоградиента, а обработка при повышенных температурах может значительно улучшить его прочность. Влияние условий твердения на развитие прочности пенобетона представлено в табл. 1.

Таблица 1

Влияние тепловой обработки на рост прочности

Возраст, сутки	Прочность при сжатии в процентах от 28-сут. прочности (температура тепловой обработки, °С)				
	22	40	50	60	70
3	26	50	78	145	150
7	47	115	162	164	152
28	100	234	206	175	152
56	149	250	206	177	158

Авторами [3] показано, что температура твердения оказывает существенное влияние на рост прочности пенобетона во времени, и в зависимости от процесса производства и требуемых сроков по отгрузке материала, скорость набора прочности может быть откорректирована. При твердении пенобетона при температуре 70°C максимальная прочность достигается в течение 3-х суток, что на 50% выше, чем прочность, измеренная в 28-суточном возрасте при температуре твердения 22°C. Даже после 7 суток прочность пенобетона, твердевшего при температуре 40°C, выше 28-суточной прочности

пенобетона при температуре 22°C. Недостаток ускоренного набора прочности заключается в снижении предельной прочности, а результаты испытаний показывают, что пенобетон, твердевший при температуре 40°C, имеет наивысшую длительную прочность (возраст 56 суток).

Константы кинетики твердения были рассчитаны по уравнениям теории переноса [4, 5]:

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma} \right)_0 + k_1 \cdot \sigma, \quad (1)$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \left(\frac{\tau}{\sigma} \right)_0 + k_2 \cdot \tau, \quad (2)$$

где τ – время твердения (гидратации), сут; σ – предел прочности при сжатии, МПа; $(\tau/\sigma)_0$ – величина, обратная начальной скорости твердения (гидратации), сут/МПа; k_1 и k_2 – коэффициенты торможения процесса твердения (гидратации). Уравнение 1 описывает кинетические процессы, происходящие с экстенсивным торможением во времени, уравнение 2 – с интенсивным. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние температуры твердения материала на кинетические константы

Температура твердения материала, °С	Значения кинетических констант по формуле 2		
	Начальная скорость U_0 , МПа/сут	Коэффициент торможения $k_{\text{тор}}$, МПа ⁻¹	Коэффициент корреляции $k_{\text{кор}}$
1	2	3	4
22	8,69	0,0049	0,9866
40	23,84	0,0032	0,9937
50	59,48	0,0045	0,9979
60	265,35	0,0056	1
70	373,12	0,0063	0,9998

Начальная скорость U_0 увеличивается по мере повышения температуры твердения. Максимальную начальную скорость твердения имеют образцы, подвергавшиеся тепловой обработке при температуре 70°C ($U_0=373,12$). Однако, при оценке прочности образцов в отдаленные сроки следует учитывать и коэффициент торможения, а он при 70°C самый высокий $k_{\text{тор}}=0,0063$. Из табл. 2 видно, что наименьший коэффициент торможения имеют образцы, подвергающиеся тепловой обработке при температуре 40°C ($k_{\text{тор}}=0,0032$). Это говорит о том, что прочность материала будет сильнее всех увеличиваться во времени. Исходя из этого, можно предположить, что пенобетон, подвергшийся тепловой обработке при температуре 40°C, будет иметь высокие прочностные показатели в отдаленные сроки твердения.

Для проверки этого предположения образцы из пенобетона разных составов подвергли тепловой обработке. ТО проводилась при температуре 40 и 90°C. Режим обработки: 2+5+2ч. В качестве добавок вводили 0,3% поташ М. и 0,4%

СК. Вид добавок и их дозировка были определены по результатам исследований [6].

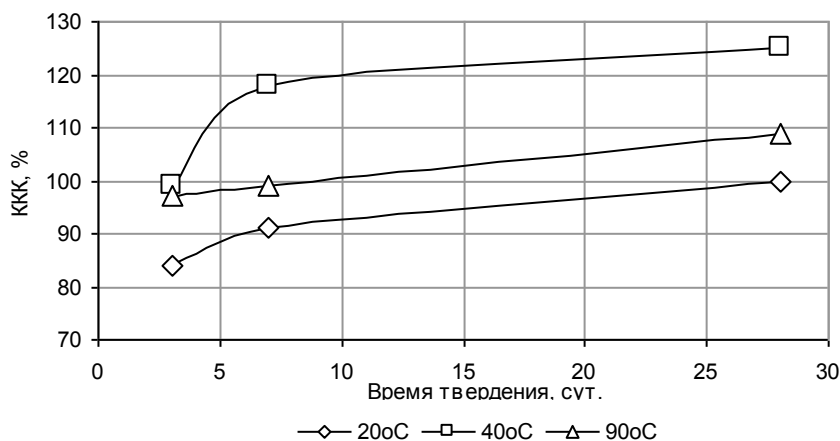
После формования образцы выдерживали 5-6 часов до момента схватывания, затем их помещали в пропарочную камеру, где подвергали тепловой обработке. После обработки образцы твердели в нормальных температурно-влажностных условиях. В возрасте 3, 7, 28 суток образцы испытывали на прочность при сжатии (изгибе). Так как средняя плотность образцов, твердевших при разных температурах, была разной, то для более объективной оценки результатов сравним коэффициенты конструкционного качества (ККК), выраженные в процентах. Результаты представлены на рис. 1.

При твердении пенобетона без добавок в нормальных условиях образцы, пропаренные при температуре 90°C, имели ККК в 28^{сут} суточном возрасте на 9% выше, чем образцы, не подвергавшиеся тепловой обработке, тогда как после тепловой обработки при температуре 40°C уже после 7^{сут} суток твердения ККК выше на 18%. Это дает основание предположить, что при

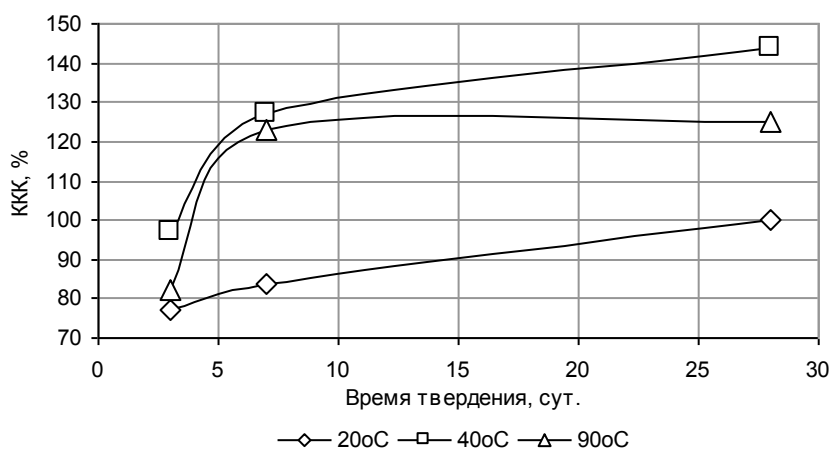
$t=40^{\circ}\text{C}$ наблюдается ускорение твердения. Наибольший прирост ККК при 90°C наблюдается при введении в систему 0,4% ускорителя

твердения СК (28 сут. – 245%). При 40°C такой эффект дает поташ М.

а)



б)



в)

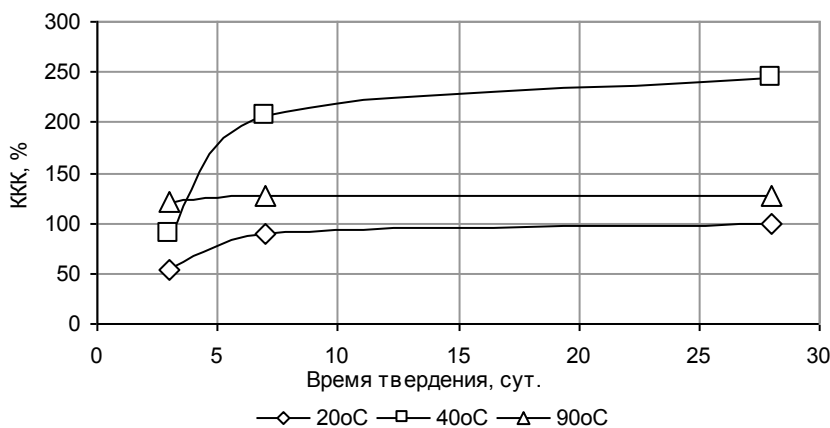


Рис.1. Влияние тепловой обработки на ККК пенобетона, состоящего из:
 а) ПЦ500 Д0+0,1Пен; б) ПЦ500 Д0+0,1Пен+0,3поташ М.; в) ПЦ500 Д0+0,1Пен+0,4СК

С помощью уравнения теории переноса рассчитаем кинетические константы твердения пенобетона. Результаты расчета представлены в табл.3.

Следует отметить, что коэффициент корреляции находится в пределах от 0,9897 до 1. Это говорит о высокой адекватности уравнения 2

фактических экспериментальных данных расчета.

С повышением температуры твердения материала до 90°C начальная скорость увеличивается. Больше всего на рост U_0 повлияло введение 0,4%СК ($U_0=9,16\text{МПа/сут.}$). У образцов состава ПЦ500Д0+0,1Пен с ростом температуры тепловой обработки до 40°C начальная скорость

увеличилась в 1,86 раза (с 0,77МПа/сут. до 1,43 МПа/сут.). А повышение температуры ТО до 90°С увеличило U_0 в 1,81 раза (с 0,77МПа/сут. до 1,39 МПа/сут.). Коэффициент торможения с

ростом температуры снизился: $t=40^\circ\text{C}$ – до 0,9741МПа⁻¹; $t=90^\circ\text{C}$ – до 1,1122МПа⁻¹. Таким образом, оптимальной температурой ТО для состава ПЦ500Д0+0,1Пен является 40°С.

Таблица 3

Влияние температуры твердения материала на кинетические константы

Доб., %	Температура твердения материала, °С	Значения кинетических констант по формуле 2		
		Начальная скорость U_0 , МПа/сут	Коэффициент торможения $k_{\text{тор}}$, МПа ⁻¹	Коэффициент корреляции $k_{\text{кор}}$
без доб.	20	0,77	1,7094	1
	40	1,43	0,9741	0,9999
	90	1,39	1,1122	0,9999
0,3% поташ М.	20	0,44	1,6765	0,9997
	40	0,78	0,8153	0,9999
	90	0,9	0,9563	0,9988
0,4% СК	20	0,17	2,4071	0,998
	40	0,35	0,5667	0,9897
	90	9,16	1,3114	1

При введении в систему 0,3% модифицированного поташа начальная скорость увеличилась с ростом температуры, а коэффициент торможения уменьшался: самый низкий $k_{\text{тор}}=0,8153 \text{ МПа}^{-1}$ наблюдался при $t=40^\circ\text{C}$. При введении 0,4% СК самый низкий коэффициент торможения имели образцы, твердевшие при температуре 40°С. Из экспериментальных (см. рис. 1) и расчетных данных (табл. 3) следует, что наиболее эффективной для пенобетона является ТО при температуре 40°С. Так же, как и у авторов [3] эта температура является оптимальной.

Выводы. Таким образом, наши исследования полностью подтвердили данные зарубежных авторов, в частности Э.П. Киерсли, об эффективности тепловой обработки при температуре 40°С. Необходимо подчеркнуть, что переход от пропарки при 80-90°С к 40°С не только улучшает кинетику твердения бетонов, в том числе пенобетонов, но и дает огромную экономию топлива - энергетических ресурсов. Величины начальной скорости и коэффициента торможения, рассчитанные по уравнению теории переноса, позволяют оценить влияние температуры тепловой обработки на интенсификацию процессов твердения и структурообразования. Это дает возможность сопоставить между собой результаты разных авторов и определить оптимальную температуру тепловой обработки пенобетонов низкой плотности. Установлено, что теплоизоляционные пенобетоны, плотностью 350-400 кг/м³ плохо подвергаются действию высоких температур. Оптимальной температурой в

данном случае является 40°С. Введение поташа М эквивалентно повышению температуры пропарки примерно на 15-20°С, а СК значительно улучшает кинетические показатели твердения при 90°С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сахаров Г.П. Эффективные материалы с повышенными теплозащитными и строительно-эксплуатационными свойствами. Поробетон-2005, С. 39-49.
2. Шелковникова Т.И., Баранов Е.В. Исследование влияния теплофизических факторов на процесс формирования структуры пеностекла // Огнеупоры и техническая керамика, №10, 2006, С.21-24.
3. Э.П Киерсли. Развитие использования пенобетона в строительной индустрии. Поробетон-2005, С. 17-24.
4. Рахимбаев Ш.М., Половнева А.В. Теоретическое обоснование энергоэффективной тепловой обработки бетона // Известия вузов. Строительство. 2014. №3. С. 22-26.
5. Рахимбаев Ш.М., Поспелова М.А., Елистраткин М.Ю. Кинетика твердения вяжущих веществ: Методические указания. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2003. 43с.
6. Рахимбаев Ш.М., Аниканова Т.В. Пенобетонные смеси с ускоренными сроками схватывания // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. № 1. С. 15-17.