

УДК 621.039.73

© 2008

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КОМПАУНДА КАК ФАКТОР ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ ЖРО

*П.В. Козлов, О.М. Слюнчев, П.А. Бобров, В.И. Карпов, Г.М. Медведев, С.И. Ровный  
Россия, г. Озерск, ФГУП "ПО "Маяк"*

Рассмотрены факторы, влияющие на величину разогрева цементного компаунда в процессе твердения. Исследовано влияние состава композиции и раствора, а также размеров цементного блока на температуру цементного компаунда. Установлено, что температура внутри цементного блока объемом 150 л может достигать 130 °С. Определено, что увеличение концентрации нитрата натрия в растворе с 300 до 450 г/л значительно снижает нагрев компаунда. Аналогичный эффект достигается введением в состав композиции низкокальциевых зол уноса ТЭЦ в количестве до 76 % от массы сухой композиции. При совместном использовании указанных подходов установлены параметры процесса, при которых температура цементного блока объемом 150 л не превышает 42 °С. На основании полученных экспериментальных данных проведены предварительные расчеты теплофизических параметров цементного компаунда и температуры внутри отсека хранилища. Согласно результатам расчета, использование золы в составе композиции и увеличение концентрации отверждаемого раствора позволит снизить температуру в отсеке с 310 до 120 °С.

Одним из основных способов локализации ЖРО низкого и среднего уровня активности является цементирование с последующей заливкой полученного радиоактивного компаунда в контейнеры различного объема. На ФГУП "ПО "Маяк" среднеактивные отходы согласно "Комплексному плану..." [1] подлежат отверждению методом цементирования. В качестве технологии цементирования ВНИПИЭТ был предложен вариант заливки цементного компаунда в отсеки большого объема (350 м<sup>3</sup>) [2]. Одним из вопросов, который не нашел должного отражения в предложенном ВНИПИЭТ проекте комплекса цементирования, является тепловыделение в больших объемах цементного компаунда. Выделение тепла связано с прохождением экзотермических реакций гидратации компонентов сухой смеси и образования новых фаз в ходе дальнейшего твердения компаунда [3].

Между тем, в условиях затрудненного теплоотвода этот фактор может играть важную роль в организации технологического процесса. В больших массивах бетонных сооружений тем-

пература повышается на 50 °С и выше от температуры бетона при его укладке. Рост температуры вызывает напряжения, которые являются результатом неравномерного нагрева и охлаждения компаунда. При определенных условиях в компаунде могут появиться трещины, а при высоких температурах возможна дегидратация компаунда с нарушением его структуры. Данная проблема особенно актуальна при отверждении среднеактивных отходов, уровень активности которых приводит к дополнительному нагреву компаунда вследствие радиоактивного распада.

Исследования по изучению гидратации портландцемента различного минералогического состава показали, что из основных минералов клинкера ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $x\text{CaO}\cdot y\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) наиболее термичными являются прежде всего  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  и  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , а основное количество тепла выделяется в первые 3–7 сут [3–5]. Исходя из данных по составу, степени и теплоте гидратации клинкерных минералов была проведена оценка величины тепловыделения при цементиро-

вании ЖРО с концентрацией нитрата натрия 300 г/л. Расчеты показали, что тепловыделение составит 240 кДж/кг цементного компаунда через 3 сут, 280 кДж/кг – через 7 сут, 325 кДж/кг – через 28 сут и 380 кДж/кг – через 180 сут. Такое тепловыделение в условиях недостаточного охлаждения может привести к росту температуры в центре отсека до 300–450 °С [6], что недопустимо как с точки зрения изолирующих свойств компаунда, так и конструкционных материалов хранилища.

Для устранения подобной ситуации можно интенсифицировать охлаждение компаунда или изменить состав вяжущего и параметры отверждения с целью снижения тепловыделения и регулирования температуры разогрева цементного компаунда.

Существуют три способа снижения выделения тепла в ходе твердения – замедление скорости реакции гидратации, введение химически инертных добавок или применение комбинации обоих подходов. Скорость гидратации должна снижаться при высокой концентрации солей в отходах, так как количество воды, доступной для взаимодействия с компонентами сухой смеси, уменьшается из-за связывания значительной ее части гидратными оболочками ионов. Различные инертные добавки (сорбционные, армирующие) в составе композиции также снижают тепловыделение цементного компаунда, т. к. не взаимодействуют с другими компонентами с заметными тепловыми эффектами (эффект разбавления).

В данной работе проведена проверка возможности реализации перечисленных подходов. В ходе экспериментов проводили измерение температуры цементного компаунда в процессе твердения для различных составов, условий отверждения и концентраций нитрата натрия.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для изучения влияния параметров отверждения на нагрев компаунда провели эксперименты по измерению температуры цементных блоков. При выполнении работы синтезировали образцы, основной композиции в которых являлся портландцемент марки 400 (ПЦ). В качестве добавок к цементу использовали бен-

тонит и низкокальциевую золу уноса ТЭЦ. Зола ТЭЦ – высокодисперсный материал (удельная поверхность 2,7 м<sup>2</sup>/г), сопоставимый с портландцементом (удельная поверхность 2,2 м<sup>2</sup>/г). Это позволяет отказаться от операций измельчения и классификации наполнителя, обеспечивая равномерное распределение золы в компаунде. В качестве раствора затворения использовали воду или растворы нитрата натрия с концентрацией от 300 до 750 г/л. Для получения образцов объемом 20–30 л применяли цилиндрические пластиковые контейнеры, для образцов объемом 150 л – кубический деревянный. В образец помещали два датчика термосопротивления и измеряли температуру в непрерывном режиме (частота опроса составляла 1 раз в 1–10 мин) в течение 30–140 ч с регистрацией данных на компьютере. Один из датчиков располагался в центре образца, а другой – на периферии. Расстояние между датчиками составляло 12,5 см для образцов объемом 20–30 л и 23,5 см для образцов объемом 150 л.

На I этапе работы были поставлены эксперименты по отверждению чистого портландцемента марки 400 водопроводной водой с целью определения наличия температурного разогрева при твердении компаунда, а также выявления влияния объема образца на величину данного параметра. На II этапе экспериментов была проведена серия опытов по определению температуры образцов при затворении компаунда растворами нитрата натрия различной концентрации. На III этапе изучали влияние введения золы ТЭЦ в состав отверждаемой композиции на разогрев цементного компаунда.

На каждом этапе работ отбирали образцы компаунда для последующего их тестирования на прочность. Образцы с размерами 2×2×2 см после окончания твердения (через 28 сут) в воздушно-влажных условиях извлекали из форм и подвергали испытаниям согласно ГОСТ 310.4 [7]. Прочность образцов на сжатие определяли на гидравлическом прессе для 4-х параллельных образцов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Всего было изготовлено 10 образцов цементного компаунда, параметры отверждения и характеристики которых представлены в табл. 1.

Внешний вид образцов объемом порядка 20–30 л, а также 150 л представлен на рис. 1.

Растворцементное отношение при цементировании изменялось от 0,27 до 0,49 л/кг. Максимальное значение относится к компаунду с содержанием 75 % золы в композиции, минимальное – 90 % портландцемента и 10 % бентонита при концентрации отверждаемого раствора 750 г/л. В последнем случае степень наполнения компаунда нитратом натрия была максимальной и достигала 14,6 %. Визуальный осмотр компаундов показал однородность материала и равномерность распределения солей по объему. Плотность компаундов менялась от 1,44 (для компаунда с 50 % золы в композиции) до 2,18 кг/дм<sup>3</sup> (для 100 % портландцемента). Прочность образцов на сжатие через 28 сут твердения изменялась в пределах от 52 до 517 кг/см<sup>2</sup> и удовлетворяла нормативным требованиям (не менее 50 кг/см<sup>2</sup> [8]). Максимальные значения прочности были получены для композиции из 100 % портландцемента. После проведения иммерсионных испытаний прочность компаунда во всех рассмотренных случаях увеличивалась на 10–110 %. Данный факт связан, по-видимому, с продолжением процессов гидратации и твердения в теле компаунда в ходе

испытаний. Следует отметить, что наибольший набор прочности (80–110 %) наблюдается для компаундов с высокой степенью наполнения по солям (14,5–14,6 % масс.), несмотря на значительное вымывание компонентов матрицы в ходе контакта с водой (потеря массы – 7–8 % от исходной). Наблюдаемый эффект может быть связан с наличием в высокосолевых компаундах большего количества непрореагировавшего материала связующего из-за дефицита воды в ходе процесса и, как следствие, более медленной кинетики гидратации и твердения. Это подтверждается тем фактом, что для компаунда, содержащего 14,6 % нитрата натрия, даже при дополнительной выдержке в воздушно-влажных условиях в течение 28 сут сверх нормативного периода (28 сут от момента затворения) наблюдается существенный рост прочности – на 30 % (со 138 до 184 кг/см<sup>2</sup>), в то время как для цементного компаунда без нитрата натрия такого прироста не наблюдается.

При получении компаунда на основе чистого портландцемента и воды температура в центре образца объемом 22 л в течение 20 ч достигла величины 54 °С ( $\Delta T \sim 31$  °С) и далее пошла на спад. Для определения влияния объема образца на степень разогрева был синтезирован

Таблица 1

Параметры отверждения и характеристики образцов

Состав композиции, % масс.				[NaNO <sub>3</sub> ], г/л	РЦО, л/кг	S <sub>соли</sub> , %	V <sub>обр</sub> , л	Плотность, кг/дм <sup>3</sup>	σ, кг/см <sup>2</sup>	
ПЦ-400	Бентонит	Зола	С-3						σ <sup>28</sup>	σ <sup>90</sup>
100,0	0	0	0	0	0,39	0	22,0	1,77	503	-
99,7	0	0	0,3	0	0,29	0	150,5	2,18	517	561
89,8	9,9	0	0,3	300	0,31	6,9	22,0	2,07	320	-
89,8	9,9	0	0,3	345	0,29	7,4	22,8	1,98	324	376
89,8	9,9	0	0,3	450	0,34	9,6	22,0	2,09	236	-
89,8	9,9	0	0,3	600	0,36	14,5	23,7	2,10	182	384
89,8	9,9	0	0,3	750	0,27	14,6	25,4	1,82	138	250
39,8	9,9	50,0	0,3	300	0,42	8,5	33,3	1,44	187	-
19,0	4,7	76,0	0,3	230	0,49	7,3	30,0	1,52	52	-
39,8	10,0	49,9	0,3	450	0,38	11,6	153,0	1,57	195	-

Примечание: РЦО – растворцементное отношение, л/кг; S<sub>соли</sub> – степень включения соли в компаунд, % масс; V<sub>обр</sub> – объем образца, л; σ – прочность на сжатие, кг/см<sup>2</sup>; σ<sup>28</sup> – прочность на сжатие образца после 28 сут твердения, кг/см<sup>2</sup>; σ<sup>90</sup> – прочность на сжатие образца после иммерсионных испытаний в течение 90 сут, кг/см<sup>2</sup>.

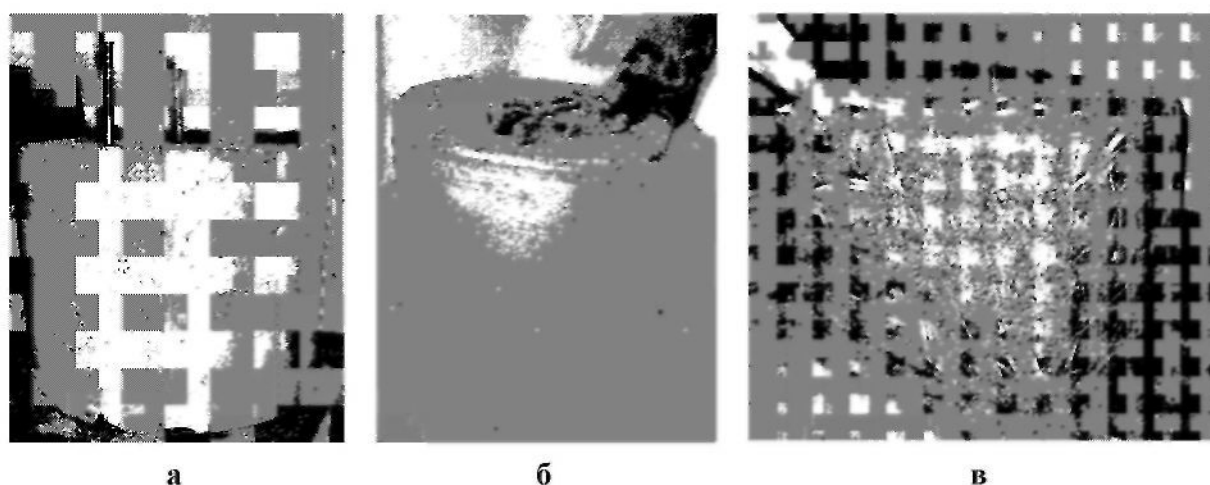


Рис. 1. Образцы компаундов объемом порядка 20–30 л на основе портландцемента (а) и портландцемента с золой ТЭЦ (б) с отвержденным раствором  $\text{NaNO}_3$  300 г/л, а также объемом 150 л (в) на основе портландцемента с золой ТЭЦ с отвержденным раствором  $\text{NaNO}_3$  450 г/л

образец объемом 150 л того же состава. В данном случае за 15 ч температура в центре образца выросла до  $129^\circ\text{C}$  ( $\Delta T=105^\circ\text{C}$ ). Увеличение объема образца привело к существенному росту величины и скорости разогрева компаунда. Время, на которое пришелся температурный пик, сократилось с 20 до 15 ч. Результаты этих измерений представлены на рис. 2 (показания центрального датчика).

Разница температур центральной и периферийной части у образца объемом 150 л в ходе эксперимента достигала  $15^\circ\text{C}$ , а для 20 л образца (того же состава) –  $7^\circ\text{C}$ .

Полученные на I этапе экспериментальные данные показали возможность значительного разогрева цементного компаунда (более  $100^\circ\text{C}$ ) в процессе твердения и подтвердили результаты сделанных ранее теплофизических расчетов.

Эксперименты по отверждению растворов нитрата натрия показали, что данная соль в концентрации до 300 г/л существенного влияния на температуру компаунда не оказывает. Температура компаунда и время, на которое пришелся температурный пик, практически совпали при цементировании воды и раствора  $\text{NaNO}_3$  (300 г/л). Заметно меньший нагрев образца наблюдали при концентрации нитрата натрия в отверждаемом растворе 345 г/л. Температурный

максимум снижался на  $12^\circ\text{C}$  (с  $54$  до  $42^\circ\text{C}$ ), а время, на которое пришелся температурный пик, увеличилось до 22 ч. Очевидно, что это связано с замедлением процессов гидратации и связанным с ними тепловыделением.

Увеличение концентрации нитрата натрия в растворе способствовало дальнейшему снижению температурного максимума и смещению температурного пика во времени. Для образцов с концентрацией отвержденного раствора 600 и 750 г/л температуру измеряли в течение 140 ч, в ходе которых температурный максимум был зафиксирован через 98–100 ч после затворения. Результаты измерения температуры в центральной части образцов компаундов объемом 22–33 л представлены на рис. 3.

Обобщенные результаты измерений температуры приведены в табл. 2. Из данных, представленных на графике и в таблице следует, что рост концентрации нитрата натрия в растворе способствует заметному снижению температуры компаунда в процессе твердения. Так, при увеличении концентрации соли с 0 до 750 г/л, температура нагрева в центре компаунда снижается с  $35$  до  $2^\circ\text{C}$ , а разница температур между центральной и периферийной частью образцов – с  $7$  до  $1^\circ\text{C}$ .

Увеличение концентрации солей в отверж-

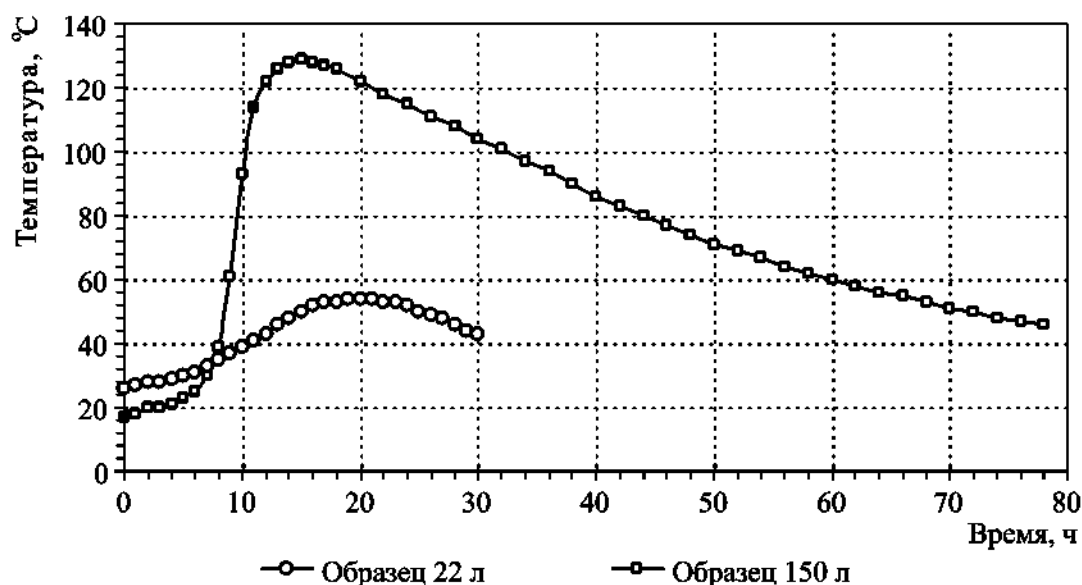


Рис. 2. Изменение температуры компаунда в процессе твердения для образцов из портландцемента

Таблица 2

Обобщенные результаты измерения температуры компаунда в процессе твердения

Состав и объем образца	$T_{\text{max}}^{\circ\text{C}}$	$T_{\text{возд}}^{\circ\text{C}}$	$T_{\text{нагр}}^{\circ\text{C}}$	$\Delta T, ^{\circ\text{C}}$
0 г/л $\text{NaNO}_3$ + ПЦ 100 %, 22 л	54	21,5–24,0	31,2	7
0 г/л $\text{NaNO}_3$ + ПЦ 100 %, 150 л	129	22,0–26,0	105,0	15
300 г/л $\text{NaNO}_3$ + ПЦ 90 % + 10 % Б, 22 л	56	20,0–21,5	35,2	7
345 г/л $\text{NaNO}_3$ + ПЦ 90 % + 10 % Б, 23 л	42	16,0–17,0	25,5	7
450 г/л $\text{NaNO}_3$ + ПЦ 90 % + 10 % Б, 22 л	26	19,5–21,5	5,5	2
600 г/л $\text{NaNO}_3$ + ПЦ 90 % + 10 % Б, 24 л	21	15,8–17,8	4,2	1
750 г/л $\text{NaNO}_3$ + ПЦ 90 % + 10 % Б, 25 л	25	22,0–24,0	2,0	1
300 г/л $\text{NaNO}_3$ + Зола 50 % + ПЦ 40 % + 10 % Б, 33 л	30	21,0–24,0	7,5	3
230 г/л $\text{NaNO}_3$ + Зола 76 % + ПЦ 19 % + 5 % Б, 30 л	25	21,0–22,0	3,5	1
450 г/л $\text{NaNO}_3$ + Зола 50 % + ПЦ 40 % + 10 % Б, 153 л	42	17,5–20,0	23,5	6

Примечание:  $T_{\text{max}}$  – максимальная температура компаунда, °C;  $T_{\text{возд}}$  – температура окружающего воздуха, °C;  $T_{\text{нагр}}$  – разница между максимальной температурой компаунда и средней температурой окружающего воздуха, °C;  $\Delta T$  – максимальная разница между показаниями датчиков температуры в центре и на периферии, °C.

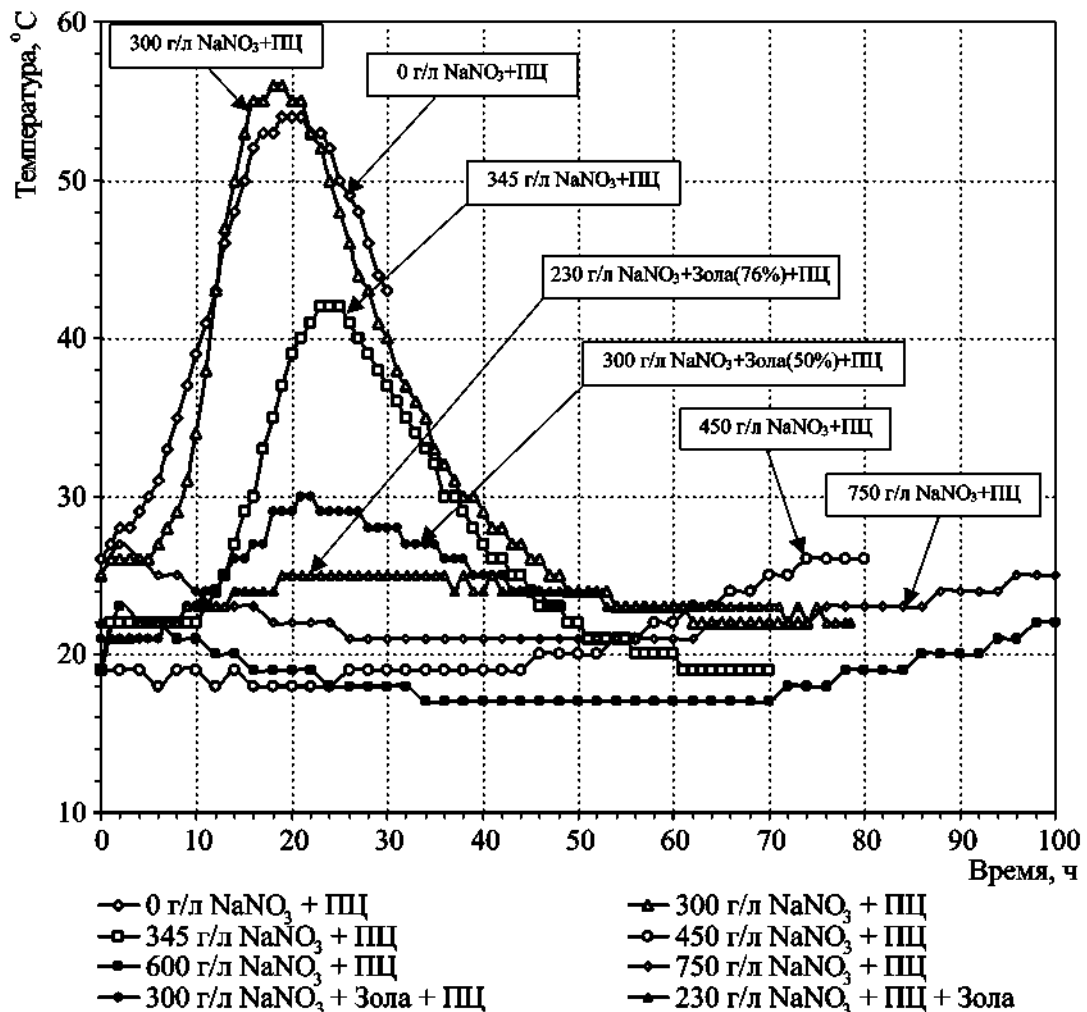


Рис. 3. Изменение температуры композита в процессе твердения для образцов различного состава объемом 22–33 л

даемом растворе приводит также к замедлению процессов твердения композита. В диапазоне концентраций нитрата натрия до 345 г/л цементный композит затвердевает в течение суток после затворения, а при концентрации соли в растворе 450–750 г/л – уже только через 2–3 сут. Данный эффект, по-видимому, связан с удержанием молекул воды в гидратных оболочках ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{NO}_3^-$ , что снижает их доступность и способность участвовать в реакциях гидратации цемента. Следует отметить, что время твердения композита хорошо коррелирует с положением

температурных максимумов на диаграммах.

На рис. 4 представлен график зависимости максимальной температуры нагрева цементного композита от концентрации отверждаемого раствора. Согласно представленным данным, резкое снижение температуры нагрева наблюдается в узкой области концентраций от 300 до 450 г/л, что говорит о возможности существенного влияния на данный параметр процесса при сравнительно небольшом увеличении концентрации отверждаемого раствора.

На последнем этапе было проведено

цементирование раствора нитрата натрия с концентрацией 300 г/л композицией, в которой от 50 до 76 % массы приходилось на золу ТЭЦ. Результаты эксперимента представлены на рис. 3 и в табл. 2. Введение 50 % золы снизило температуру нагрева компаунда с 35,2 до 7,5 °С, хотя объем образца (30 л) был почти на 40 % больше. Увеличение доли золы в композиции до 76 % снизило температуру нагрева компаунда

до 3,5 °С, а перепад температуры внутри образца – до 1 °С. При этом наблюдали замедление процессов гидратации (температурный максимум сдвинулся с 18 до 21 ч после затворения). Зависимость температуры нагрева цементного компаунда от содержания золы в составе композиции представлено на рис. 5.

Полученные компаунды были однородны и монолитны. Тестирование образцов компа-

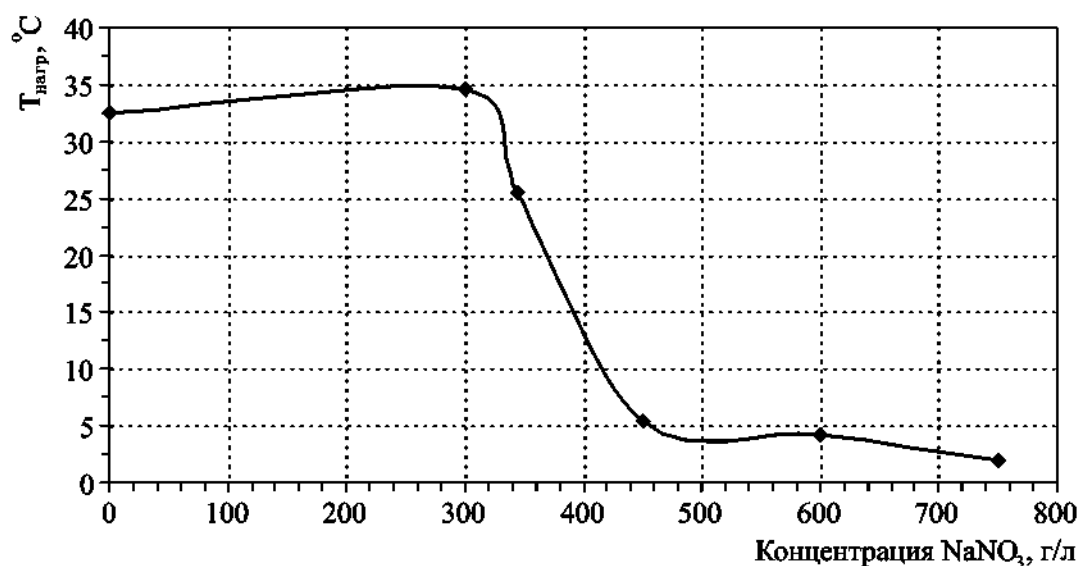


Рис. 4. Зависимость температуры нагрева цементного компаунда от концентрации нитрата натрия в отверждаемом растворе

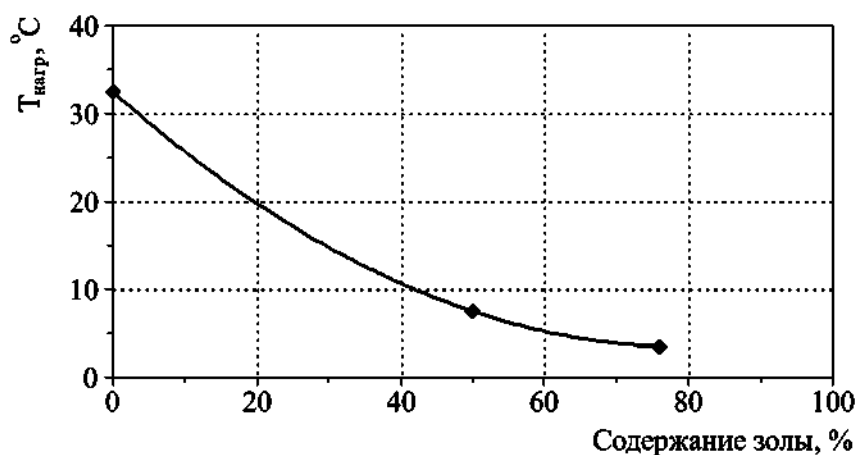


Рис. 5. Зависимость температуры нагрева цементного компаунда от содержания золы в составе композиции

унда на прочность (187 и 52 кг/см<sup>2</sup>) показало соответствие их нормативным требованиям. Однако прочность компаунда с максимальным содержанием золы очень близка к минимально допустимой величине, что говорит о нежелательности применения композиции с таким высоким содержанием золы для отверждения ЖРО.

Согласно полученным данным, представ-

ленным на рис. 6, при увеличении концентрации соли в отверждаемом растворе от 0 до 750 г/л прочность компаунда на основе портландцемента снижается от 517 до 138 кг/см<sup>2</sup>. Следовательно, во всем исследованном диапазоне концентраций раствора нитрата натрия прочность цементного компаунда соответствует нормативным требованиям [8], превышая

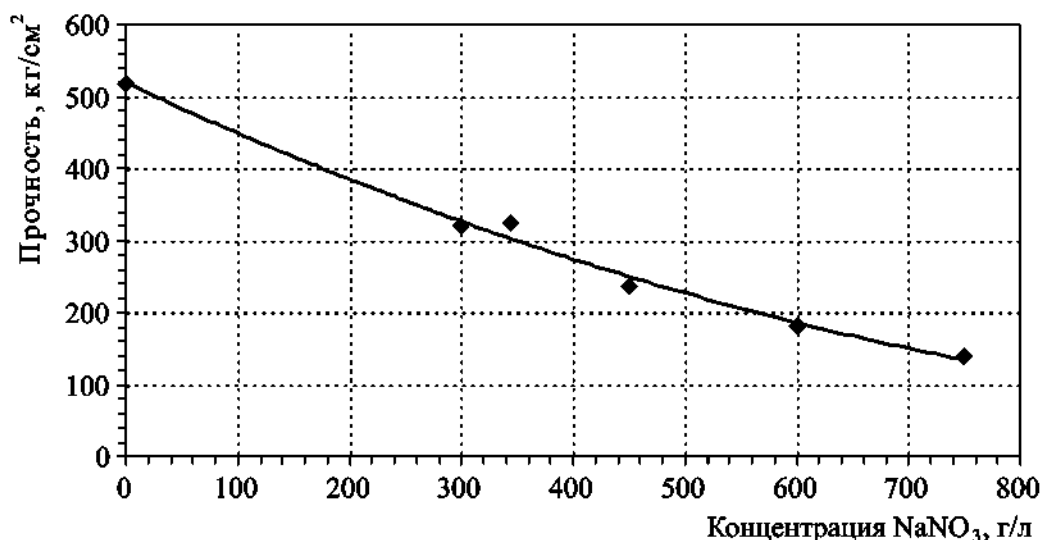


Рис. 6. Зависимость прочности цементного компаунда от концентрации нитрата натрия в отверждаемом растворе

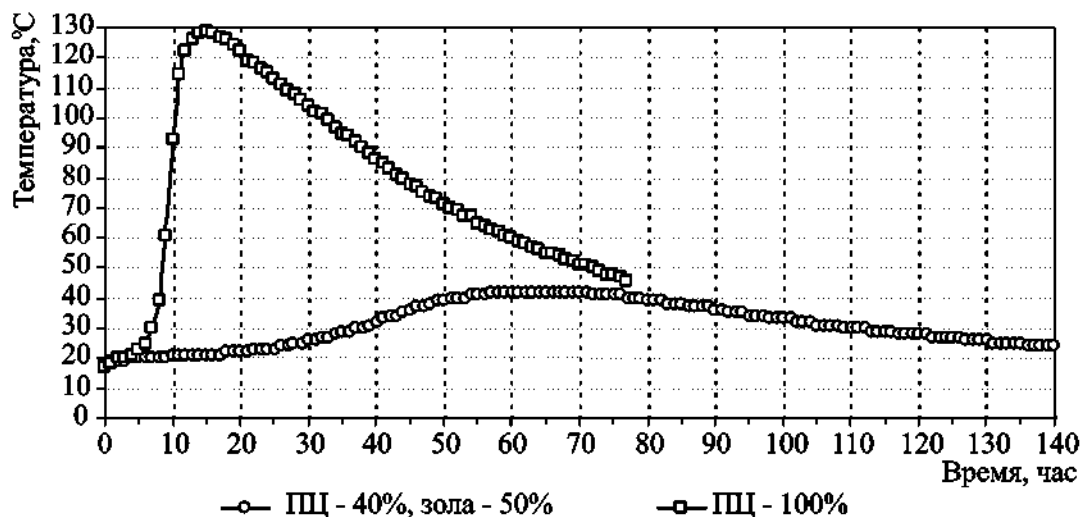


Рис. 7. Изменение температуры компаунда в процессе твердения для образцов большого объема (порядка 150 л)



минимально допустимую величину ( $50 \text{ кг/см}^2$ ) в 3–10 раз.

Заключительным экспериментом являлось отверждение раствора нитрата натрия с концентрацией  $450 \text{ г/л}$  в объеме компаунда порядка  $150 \text{ л}$  композицией, состоящей на 50 % из золы ТЭЦ. Результирующая температурная кривая процесса твердения данного образца представлена на рис. 7. Для сравнения на этой же диаграмме размещена соответствующая кривая для образца аналогичного объема без золы и нитрата натрия.

Сопоставляя полученные результаты, следует отметить, что применение выбранных способов воздействия на тепловые процессы в ходе твердения компаунда позволяет существенно снизить величину температурного максимума (со  $129$  до  $42 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и сместить его по времени на  $45\text{--}50 \text{ ч}$  (с  $15$  до  $60\text{--}70 \text{ ч}$ ).

На основании полученных экспериментальных данных были проведены расчеты температуры внутри отсека хранилища цементного компаунда. Изменение температуры компаунда в отсеке для состава на основе смеси портландцемента (40 %) с золой (50 %) и бентонитом (10 %) представлено на рис. 8.

При расчетах температуры цементного компаунда в отсеке исходили из следующих условий.

Хранилище отвержденных САО представляет собой систему железобетонных отсеков, заполняемых цементным компаундом, с габаритными размерами  $5 \times 5 \times 14 \text{ м}$ . Толщина железобетонных перегородок между отсеками составляет  $0,6 \text{ м}$ , верхней и нижней плит – от  $0,7$  до  $1,0 \text{ м}$ . Отсеки расположены вплотную друг к другу по 10 отсеков в ряду. Максимальное количество рядов – 10 [2, 9]. Загрузка отсеков цементным компаундом осуществляется порционно по  $3 \text{ м}^3$  в сутки.

Как следует из результатов расчетов, температура внутри отсека в большой степени будет зависеть от теплофизических параметров получаемого цементного компаунда, которые, в свою очередь, зависят от свойств исходных материалов, в частности, портландцемента. В ходе проведенных экспериментальных работ использовали портландцемент марки 400 цементного завода г. Сухой Лог Свердловской области. Обработка экспериментальной кривой (рис. 7, состав с 50 % золы) показала, что наиболее близкое совпадение эксперимен-

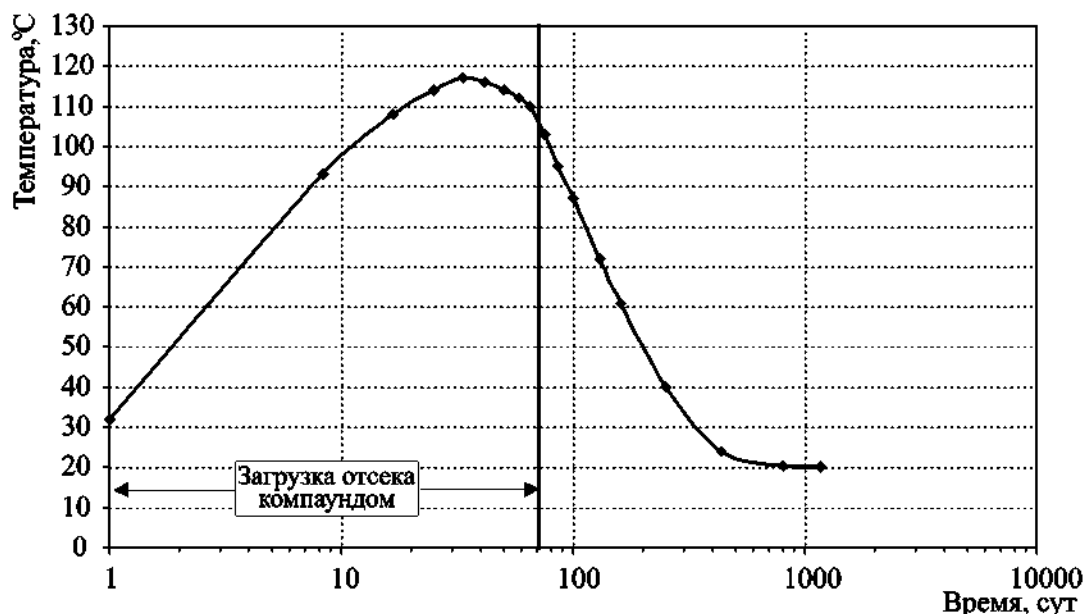


Рис. 8. Изменение температуры цементного компаунда в отсеке для состава с 50 % золы в сухой смеси

тальной и расчетной кривых было получено при использовании для расчетов значения теплоемкости, равного 1,15 кДж/кг. При данном значении теплоемкости максимальная расчетная температура, до которой могут нагреться центральные области загружаемого отсека за счет гидратационного тепла, будет достигнута примерно через месяц после начала загрузки и составит 117 °С. Затем, за счет теплоотвода в соседние пустые отсеки, температура начнет снижаться и на момент окончания загрузки отсека компаундом на основе портландцемента, золы и бентонита (через 72 сут от начала) составит примерно 100 °С. Таким образом, введение в состав сухой смеси 50 % низкокальциевой золы уноса АТЭЦ и увеличение концентрации нитрата натрия в отверждаемом растворе до с 300 до 450 г/л позволит снизить максимальную температуру в отсеке с компаундом с 307 [6] до 117 °С. Следует отметить, что представленные результаты не учитывают радиационный нагрев компаунда.

Таким образом, анализ литературных данных и результаты экспериментов показали, что величина разогрева цементного компаунда в процессе твердения зависит от значительного количества различных факторов, из которых важнейшими являются размеры цементного блока, состав композиции и отверждаемого раствора.

По результатам испытаний установлено, что с увеличением размера образца наблюдается существенный рост его температуры, а также перепада температур между его центральной и периферийной частями. Экспериментально зафиксирована температура 129 °С внутри блока объемом 150 л для цементного компаунда без каких-либо добавок.

Установлено, что увеличение концентрации раствора нитрата натрия в интервале от 300 до 450 г/л, а также введение в состав композиции низкокальциевой золы ТЭЦ в количестве до 76 % от массы сухой композиции позволяет значительно снизить температуру компаунда в процессе его твердения. Так, для образца объемом 153 л с 50 % золы в составе композиции и концентрацией нитрата натрия в отверждаемом растворе 450 г/л температура в центре блока не превысила 42 °С. Для всех исследованных параметров отверждения (составов композиции

и раствора) компаунд сохраняет однородность и монолитность и удовлетворяет нормативным требованиям по механической прочности.

На основании полученных экспериментальных данных проведены предварительные расчеты температуры внутри отсека хранилища цементного компаунда. Последняя составила 307 °С для компаунда с параметрами, заложенными в настоящее время в проекте комплекса цементирования, и 117 °С для компаунда оптимизированного состава.

Для более точного определения теплофизических параметров процесса и поведения цементного компаунда при отверждении различных ЖРО с учетом их химической специфики и последующего хранения необходимо проведение исследований по определению суммарного теплового эффекта при отверждении отходов, теплоемкости и теплопроводности цементного компаунда, математическому моделированию процесса разогрева цементного компаунда при различных условиях отверждения. Данные исследования позволят оптимизировать процесс цементирования с целью обеспечения всех необходимых требований к компаунду.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Комплексный план мероприятий по обеспечению решения экологических проблем, связанных с текущей и прошлой деятельностью ФГУП "ПО "Маяк". – Инв. № 4846, 2003. – 64 с.
2. Завод 235. Здание 940. Создание комплекса цементирования жидких и гетерогенных среднеактивных отходов (САО): проект ВНИПИЭТ. – Инв. № 304–2802, 2004.
3. Баженов Ю.М. Технология бетона: Учебник. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 500 с.
4. Рояк С.М., Рояк Г.С. Специальные цементы. – М.: Стройиздат, 1993. – 416 с.
5. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. Ч. I. – С.-Пб.: АНО НПО "Мир и Семья", АНО НПО "Профессионал", 2002. – 988 с.
6. Расчет температуры внутренних слоев цементного компаунда при его равномерной загрузке в отсеки хранилища наливного типа: Сообщение / ФГУП "ПО "Маяк"; Исполн. В.И. Карпов. – ЦЛ/5514 от 08.11.07. – Озерск, 2007. – 11 с.

7. ГОСТ 310.4–81 Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии.
8. ГОСТ Р 51883–2002 Отходы радиоактивные цементованные. Общие технические требования.
9. Проведение теплофизических расчетов, расчетов по радиационному воздействию и расчетов по взрывопожаробезопасности хранилищ САО ФГУП “ПО “Маяк”: Отчет / ФГУП “Уральский государственный проектно-исследовательский институт “ВНИПИЭТ”. – Инв. № 305–2482. – Озерск, 2005.