

УДК 621.039.73

Расчет тепломассообмена при долговременном хранении радиоактивных отходов

В.А. Попков^а,

Н.А. Науменко^б, Т.А. Кулагина^{в*}

^аФГУП «Горно-химический комбинат»

Россия, 662972, Железногорск, Красноярский край, ул. Ленина, 53

^бОАО «Инженерный центр ядерных контейнеров»

Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

^вСибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

Received 12.02.2014, received in revised form 27.03.2014, accepted 07.04.2014

Представлены результаты теоретического теплового расчета температурного поля в стандартной 200-литровой бочке для трех различных процессов: охлаждения воды и цементного компаунда, выделения тепла радиоактивного распада радионуклидов в цементном компаунде, твердения цементного компаунда. С помощью построенной численной модели было показано, что при твердении цементного компаунда внутренний объем бочки нагревается до 90 °С и более, а перегрев центральных областей относительно периферийных составляет 2530 градусов. На созданной установке для непосредственного измерения температурного поля в бочке и на поверхности ее теплообмена с окружающей средой проведена оценка теплофизических характеристик бочки и процесса твердения цементного компаунда. Вычисленный усредненный коэффициент теплоотдачи для всей охлаждающей поверхности бочки оказался равным 9,86 Вт/м²·К, что почти в два раза больше, чем значение, вычисленное с помощью общеизвестных критериальных уравнений. Интенсивность тепловыделения в процессе твердения цементного компаунда существенно возрастает при снижении водовязущего отношения (В/В) $V/B < 0,5$. Показано, что предложенная численная модель с достаточной для технических расчетов точностью описывает тепловые процессы, происходящие при твердении цементного компаунда в бочке при $V/B \geq 0,5$.

Ключевые слова: тепловой расчет, температурное поле, цементирование, жидкие радиоактивные отходы, пульпы, цементный компаунд.

Введение

Гидратация цемента при «схватывании» бетона сопровождается значительным тепловыделением [1], так как в этом процессе оказываются задействованы разнообразные экзотермические реакции: растворение, смачивание, гашение извести, образование гидратов из окислов кальция, алюминия и кремния и их последующая кристаллизация в различных сочетаниях. В

результате происходит разогрев бетона, особенно существенный для образцов большого размера, для которых теплоотдача невелика по сравнению с интенсивностью внутреннего тепловыделения. Повышенные температуры оказывают влияние на кинетику физико-химических процессов в застывающей массе и в конечном итоге на качество бетона [2]. Поэтому при проектировании массивных бетонных конструкций необходимы предварительные теплофизические исследования [3] и расчеты.

Необходимость такого предварительного расчета возникает и при использовании в технологиях кондиционирования жидких радиоактивных отходов (ЖРО) метода цементирования. Цементирование представляет собой процесс иммобилизации ЖРО в цементную матрицу с получением твердого конечного продукта (цементного компаунда), направляемого далее на безопасное длительное хранение [4, 5]. Процесс цементирования заключается в смешении жидких солевых концентратов и пульпы с цементом с последующим схватыванием и образованием твердого монолита.

В настоящее время для хранения цементного компаунда используют два типа контейнеров: невозвратный защитный контейнер НЗК-150-1,5 [6] и стандартную 200-литровую металлическую бочку [7]. И в том, и в другом случае возможен сильный разогрев цементного компаунда в процессе его твердения.

В работе для стандартной 200-литровой металлической бочки проведены теоретические тепловые расчеты, в основе которых лежат решения задачи теплопроводности для различных исходных данных и начальных условий и выполнены экспериментальные исследования, позволившие оценить теплофизические характеристики бочки и подтвердить правильность полученных расчетных результатов.

1. Теоретический тепловой расчет

Задачей проведения настоящего теплового расчета является определение температурного поля в бочке с цементным компаундом в процессе его твердения и последующего хранения, т.е. получение решения уравнения теплопроводности для частных условий, которые можно определить исходя из следующих соображений.

Во-первых, процесс твердения цементного компаунда в бочке в рассматриваемом временном интервале является с точки зрения теплопереноса процессом нестационарным, так как температурное поле в нем непрерывно меняется во времени из-за тепловыделения при реакции твердения цемента. Во-вторых, процесс теплообмена с окружающей средой также нестационарный из-за непрерывного изменения температуры поверхности теплообмена. В-третьих, процесс теплообмена бочки с окружающей средой в ходе длительного хранения бочки в хранилище принимает характер стационарного из-за выделения тепла при радиоактивном распаде содержащихся в цементном компаунде радионуклидов.

С определенными упрощениями реально протекающего процесса теплообмена для двух последних случаев есть готовые аналитические решения.

1.1. Решение для цилиндра конечных размеров

Для нахождения распределения температуры среды в объеме бочки в любой момент времени использовано решение для нестационарного температурного поля в цилиндре конечного

размера в процессе его охлаждения [8, с. 261] с пространственным краевым условием третьего рода, которое связывает температуру стенки с температурой окружающей среды через заданное значение коэффициента теплоотдачи от стенки к этой среде.

Пространственные краевые условия определяются геометрическими размерами бочки: R – радиус бочки, равный 0,3 м; H – высота бочки, равная 0,8 м, которые задают ограждающую поверхность теплообмена бочки с окружающей средой, а также условиями теплообмена на ограждающих поверхностях.

Для расчета коэффициента теплоотдачи от стенки к окружающей среде использовано критериальное уравнение, описывающее теплообмен при свободной конвекции [9]

$$Nu = 0,135(Gr * Pr)^{0.33}, \quad (1)$$

где Nu – критерий Нуссельта; Gr – критерий Грасгофа; Pr – критерий Прандтля.

Среда в бочке – вода или цементный компаунд, окружающая среда – воздух.

Расчет по уравнению (1) дает значения $\alpha = 67$ Вт/м²·К для разности температур стенки и окружающей среды от 5 до 50 градусов, что позволяет считать его постоянным в течение всего процесса теплообмена бочки с окружающей средой.

Постановка задачи. Дан цилиндр радиусом R и высотой $H = 2l$, температура которого равна T_0 . В начальный момент времени он помещается в среду с постоянной температурой $T_c > T_0$. Требуется найти распределение температуры в любой момент времени при условии симметричной задачи по рис. 1.

Уравнение теплопроводности преобразуется:

$$\frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(r, z, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, \tau)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, \tau)}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\tau > 0; 0 < r < R; -l < z < +l.$$

Начальные и граничные условия

$$T(r, z, 0) = T_0 = const \quad (3)$$

$$-\frac{\partial T(R, z, \tau)}{\partial r} + \frac{\alpha}{\lambda} [T_c - T(R, z, \tau)] = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(0, z, \tau)}{\partial r} = 0 \quad T(0, z, \tau) \neq \infty \quad (5)$$

$$-\frac{\partial T(r, l, \tau)}{\partial z} + \frac{\alpha}{\lambda} [T_c - T(r, l, \tau)] = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial T(r, 0, \tau)}{\partial z} = 0. \quad (7)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$1 - \theta = \frac{T_c - T(r, z, \tau)}{T_c - T_0} = \sum_{n=lm=1}^{\infty} \sum_{n=lm=1}^{\infty} A_{n,1} A_{m,2} J_0(\mu_{n,1} \frac{r}{R}) \cos \mu_{m,2} \frac{z}{l} \exp[-(\frac{\mu_{n,1}^2}{R^2} + \frac{\mu_{m,2}^2}{l^2}) a \tau], \quad (8)$$

где $A_{n,1}$, $A_{m,2}$ – постоянные коэффициенты, определяемые по формулам

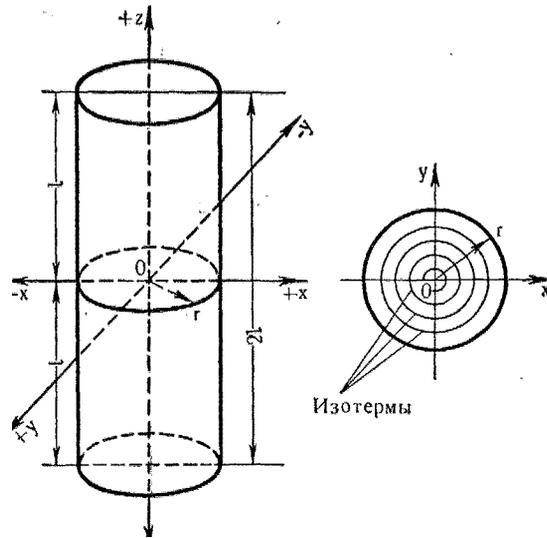


Рис. 1. Схема задачи о нагревании или охлаждении цилиндра конечных размеров

$$A_{n,1} = \frac{2Bi_1}{J_0(\mu_{n,1})(\mu_{n,1}^2 + Bi_1^2)}; \quad A_{m,2} = (-1)^{m+1} \frac{2Bi_2\sqrt{Bi_2^2 + \mu_{m,2}^2}}{\mu_{m,2}(Bi_2^2 + \mu_{m,2}^2 + Bi_2)}, \quad (9)$$

где $\mu_{n,1}$, $\mu_{m,2}$ – корни соответствующих характеристических уравнений; J_0 – функция Бесселя нулевого порядка; Bi_1 , Bi_2 – критерии Био, равные al/λ и $\alpha R/\lambda$ соответственно.

Для дальнейших расчетов приняты следующие величины:

Критерии Био для воды:

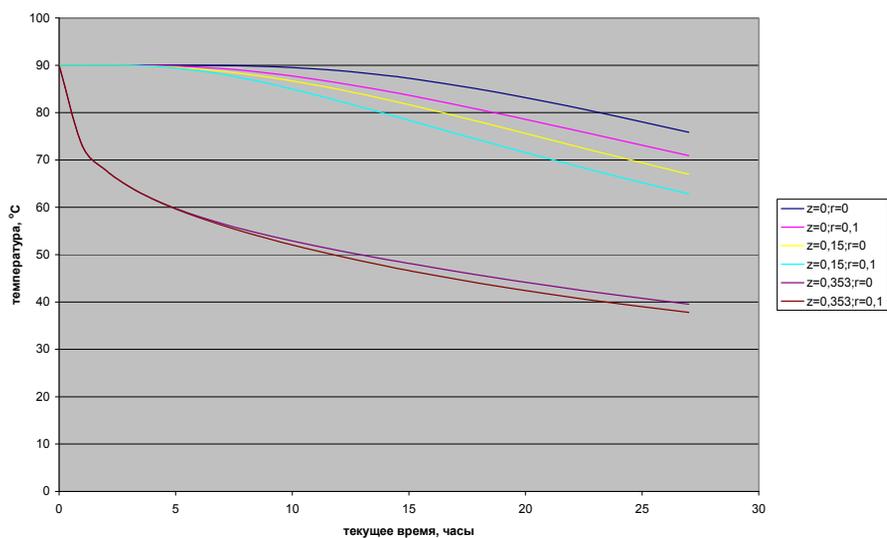
для координаты z $Bi_1 = al/\lambda = 4,176$; для координаты r – $Bi_2 = \alpha R/\lambda = 3,544$.

Критерии Био для цементного компаунда:

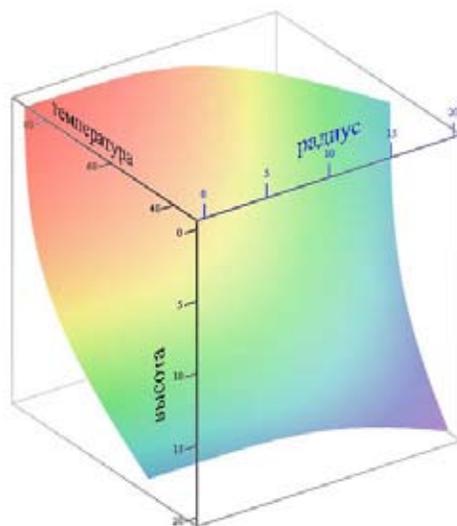
для координаты z $Bi_1 = al/\lambda = 2,408$; для координаты r – $Bi_2 = \alpha R/\lambda = 2,044$.

Расчет проводили для случая охлаждения в бочке воды, равномерно нагретой по всему объему до 90 °С. Результаты такого расчета можно проверить на практике, предварительно нагрев воду до нужной температуры, а затем тщательно перемешать. Результаты расчетов по уравнению (8) представлены на рис. 2а в виде временных зависимостей температуры в разных точках бочки. Расчетный профиль температур в различных сечениях бочки после 10 ч охлаждения в ней воды представлен на рис. 2б. Аналогичные результаты расчетов по уравнению (8) для случая охлаждения в бочке цементного компаунда изображены на рис. 3.

Сравнивая ход охлаждения воды и цементного компаунда, можно сделать вывод о том, что оба процесса описываются аналогичными степенными зависимостями, но цементный компаунд остывает намного быстрее воды вследствие разницы в теплофизических характеристиках. Судя по температурным профилям в различных сечениях бочки, представленным на рис. 2 и 3, процесс остывания характеризуется значительными градиентами температуры между центральными точками и точками на поверхности теплоотвода, а лимитируют процесс отвода тепла теплофизические характеристики содержимого бочки.



а



б

Рис. 2. Временные зависимости температуры в разных точках бочки при охлаждении воды (а); профиль температуры в различных сечениях бочки после 10 ч охлаждения в ней воды (б)

1.2. Решение для цилиндра конечных размеров с внутренним тепловым источником

В литературе приведено аналитическое решение для определения стационарного температурного поля в цилиндрическом стержне при наличии равномерно распределенных внутренних источников тепла постоянной плотности и постоянных физических характеристик [10, с. 54]. Такое поле будет иметь место в процессе теплообмена бочек с окружающей средой в ходе их длительного хранения в хранилище из-за выделения тепла при радиоактивном распаде содержащихся в цементном компаунде радионуклидов.

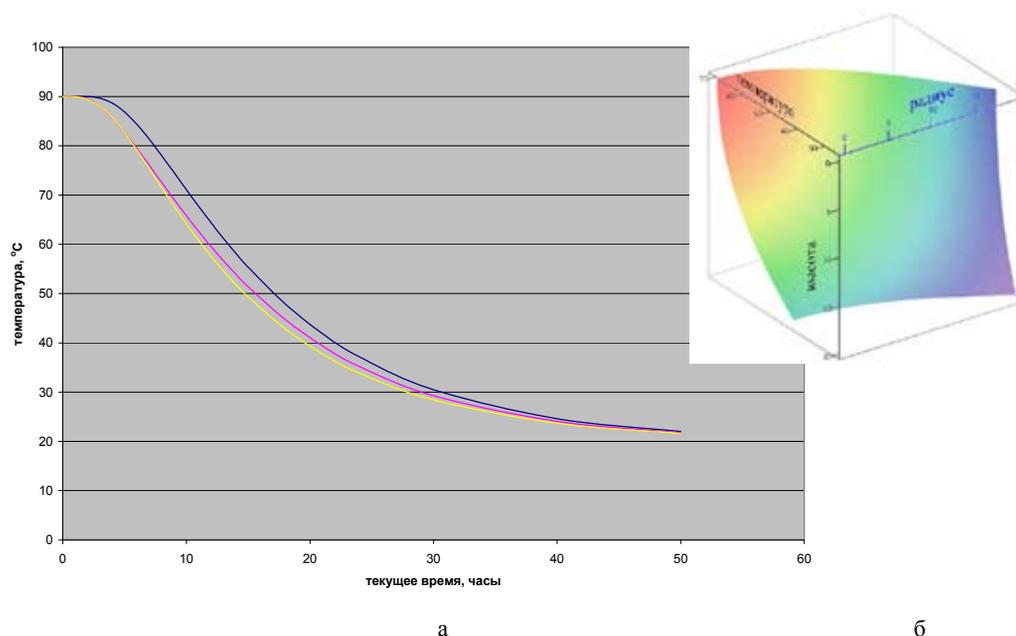


Рис. 3. Временные зависимости температуры в разных точках бочки при охлаждении цементного компаунда (а); профиль температуры в различных сечениях бочки после 10 ч охлаждения в ней цементного компаунда (б)

С некоторым приближением бочки, расположенные в хранилище, можно представить как длинный сплошной цилиндрический стержень, высота которого существенно превышает его радиус. Такое допущение позволяет использовать для определения стационарного температурного поля в бочке решение для стержня, которое имеет вид

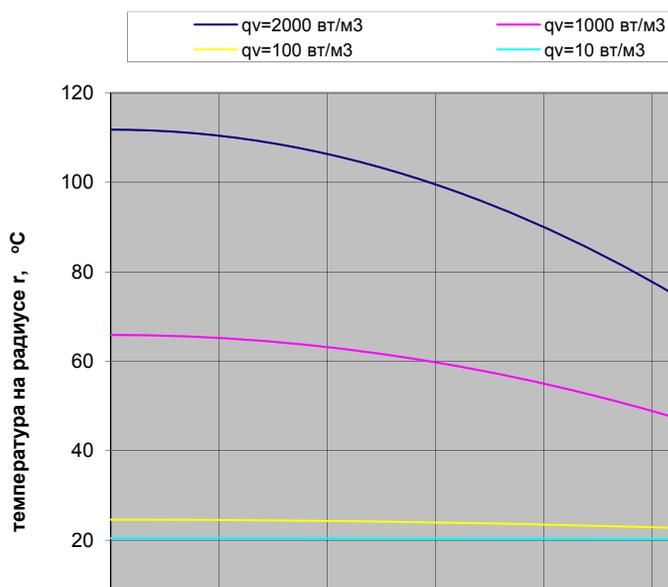
$$T_r = T_0 + \frac{q_v R^2}{4\lambda} \left[\frac{2\lambda}{\alpha R} + 1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right], \quad (10)$$

где q_v – объемная плотность теплового потока внутреннего источника, Вт/м³.

Вычисленное распределение температур в бочке с равномерно распределенными внутренними источниками, т.е. когда q_v имеет одно и то же значение во всех точках бочки, для разных значений q_v представлено на рис. 4. Как следует из этих данных, существенный градиент температуры по сечению бочки может наблюдаться при значениях $q_v = 1000$ Вт/м³ и более.

1.3. Модель для контейнера долговременного хранения отвержденных РАО (бочки)

Готовые математические решения уравнения теплопроводности, учитывающие условия твердения цементного компаунда в бочке, в литературе отсутствуют. Поэтому была предпринята попытка построения математической модели, позволяющей рассчитывать распределение температуры в емкости цилиндрической формы при застывании в ней цементного компаунда. В модели учитывается кинетика процессов тепловыделения, перераспределение тепла вследствие теплопроводности и теплоотдачи во внешнее пространство.

Рис. 4. Стационарное температурное поле в бочке с внутренними источниками тепла мощностью q_v .

В процессе застывания цементного компаунда происходит большое число взаимосвязанных реакций, и в математической модели, описывающей кинетику теплообразования, неизбежны значительные упрощающие предположения, которые позволяют использовать минимальное число переменных и коэффициентов. Поскольку эти параметры могут зависеть от химического и гранулометрического состава цементной смеси, то определить их универсальным образом невозможно. Тем не менее, по данным двух независимых калориметрических исследований, при сильно отличающихся массах и составах цементного компаунда эти параметры были определены подбором и их значения оказались в одном и том же диапазоне. Это свидетельствует о том, что сделанные упрощающие предположения относительно кинетики теплообразования в основном правильно описывают основные закономерности сложного многокомпонентного процесса затвердевания цементного компаунда и приемлемы для математического моделирования.

Для предварительного определения кинетических коэффициентов были взяты за основу калориметрические исследования затвердевания цементного компаунда, приведенные в [11]. В этом эксперименте использовалась относительно небольшая масса цементного компаунда (650 г), поэтому неоднородностью распределения температуры в этой системе можно пренебречь. В этом случае процесс затвердевания можно описывать системой обыкновенных дифференциальных уравнений.

Уравнение для температуры в рассматриваемом эксперименте имеет вид

$$S \frac{dT}{dt} = \alpha(T_0 - T) + J, \quad (11)$$

где S обозначает теплоемкость калориметра, α – коэффициент теплоотдачи, T_0 – внешняя температура. Величина J описывает интенсивность теплообразования. Для однотипных

экзотермических реакций уравнение теплоотдачи замыкается кинетическим соотношением вида

$$Q \frac{dC}{dt} = -J(C, T), \quad (12)$$

где C обозначает количество вещества, способного вступить в реакцию, а Q – количество тепла, выделяемого при вступлении в реакцию одной единицы C . Интенсивность J/Q , с которой происходит реакция, зависит как от количества потенциального реагента, так и от температуры.

Для завершения математической формулировки задачи интенсивность теплообразования $J(C, T)$ в уравнениях (11) и (12), как функция от C и T , задана в виде кинетического соотношения, описывающего совокупную реакцию застывания цементного компаунда:

$$J = C_0 \beta \left(\frac{C}{C_0} \right)^n \exp \left(\frac{\gamma T}{273^\circ (T + 273^\circ)} \right), \quad (13)$$

где C_0 обозначает начальное содержание цемента в системе, а n , β и γ – свободные параметры, которые следует подобрать так, чтобы теоретическое (численное) решение $T(t)$ системы уравнений (11) и (12) с соответствующими начальными условиями максимально совпало с измеренной в опыте зависимостью температуры от времени.

По измеренным в [11] данным относительно $T(t)$ в диапазоне от 3 до 7 сут, по зависимости в логарифмических координатах был определен показатель в этой формуле: $n \approx 1.6$. Оставшиеся параметры β и γ выбирали так, чтобы экспериментальный максимум разогрева и по времени, и по величине температуры совпал с определенным числом. Получили значения $\beta \approx 0,14$ Вт/кг и $\gamma \approx 7600$ °С. Результаты сравнения теоретической кривой $T(t)$ с экспериментом представлены на рис. 5.

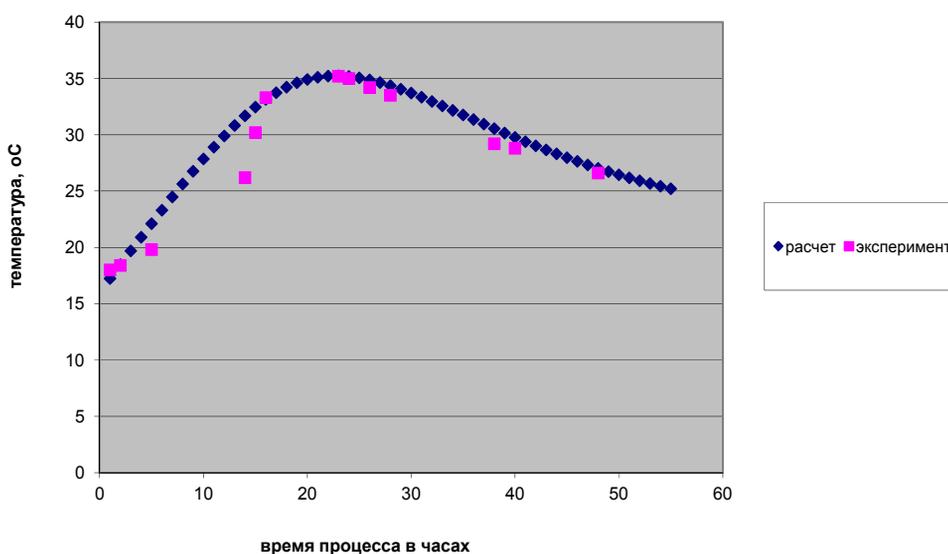


Рис. 5. Параметризация кинетических параметров

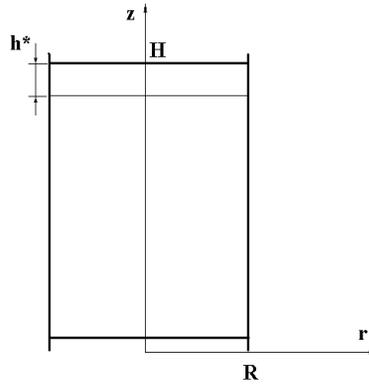


Рис. 6. Схематическое изображение толщиной h металлической бочки с цементным компаундом

При построении 3D-модели (в виде системы дифференциальных уравнений) бочка рассматривается как цилиндрическая емкость в форме, изображенной на рис. 6. Высота заполнения бочки $H = 71$ см, радиус $R = 30$ см. Под верхней крышкой имеется воздушная прослойка.

Систему уравнений для процессов перераспределения тепла в цилиндрических координатах запишем в виде

$$\begin{cases} c_v \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \cdot r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + J(C, T) \\ Q \frac{\partial C}{\partial t} = -J(C, T) \end{cases}, \quad (14)$$

где λ обозначает теплопроводность, переменная C и теплоемкость c_v здесь относятся к единице объема, а для J снова принимается формула (13). Не вынося теплопроводность за знаки частных производных, создаем возможность считать физические коэффициенты системы переменными по пространственным координатам: свои для цементного компаунда, для стальных стенок бочки и для воздуха под крышкой.

Как было определено, на стальной поверхности бочки задаются граничные условия 3-го рода, а именно

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_0), \quad (15)$$

где T_0 – температура внешней среды, а α – коэффициент теплоотдачи стали в воздух.

Разностная аппроксимация системы (14) строится разбивкой области на стандартные ячейки по цилиндрическим переменным r , φ и z . Каждая ячейка имеет вид криволинейного параллелепипеда с ребрами dr , $r d\varphi$ и dz , показанного на рис. 7, кроме ячеек на оси, имеющих форму куска торта.

Для удобства высота верхнего слоя ячеек положена равной h , чтобы избежать численного решения уравнений в области с большим разбросом значений теплопроводностей для цементного компаунда, стали и воздуха, который плохо влияет на устойчивость и сходимость раз-

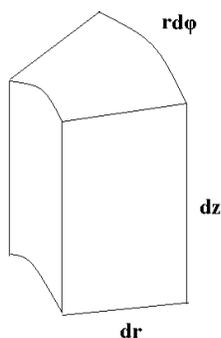


Рис. 7. Ячейка в задаче разностной аппроксимации

ностных схем. Фактически такой выбор верхнего слоя ячеек эквивалентен пересчету граничных условий.

В ячейках, примыкающих к боковым стенкам, учет присутствия стальной оболочки был произведен путем увеличения проводимостей этих ячеек в вертикальном и азимутальном направлении, так как сталь имеет на порядок большую теплопроводность, чем цементный компаунд. На проводимость в радиальном направлении это не оказывает существенного влияния. Сама разностная схема составлена стандартным методом конечных элементов с явной аппроксимацией по времени. С помощью построенной численной модели было определено температурное поле в бочке в процессе твердения цементного компаунда. Результаты отображены на рис. 8 в виде временных зависимостей температур в разных точках вертикальной оси бочки.

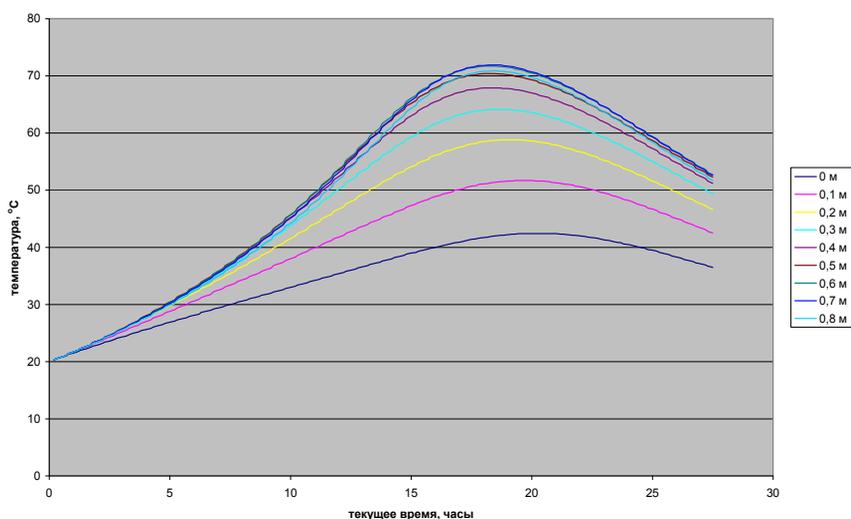
На основании результатов, представленных на рис. 8, можно констатировать, что внутренний объем бочки нагревается до температур $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и более, что на практике отмечалось и ранее. Перегрев центральных областей относительно периферийных составляет 2530 градусов, что лишний раз свидетельствует о необходимости принятия мер для снижения величины этого перегрева для обеспечения однородности и качества цементного компаунда.

2. Экспериментальные исследования

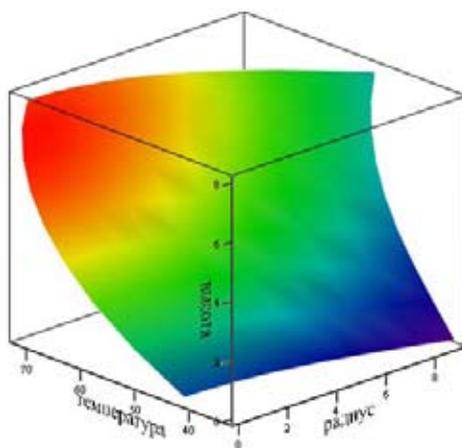
2.1. Экспериментальная установка

для измерения температурного поля в бочке

Для экспериментального подтверждения теоретических расчетов по различным моделям была создана установка для непосредственного измерения температурного поля в бочке и на поверхности теплообмена ее с окружающей средой. Для измерения температуры используют два типа датчиков. Хромель-копелевые термодпары (ТП), закрепленные на жестком каркасе, прикрепленном к крышке бочки, применяют для измерения температуры во внутреннем объеме бочки. Платиновые термометры сопротивления (ТС), наклеенные на наружной поверхности бочки, нужны для измерения температуры боковой стенки, дна и крышки бочки. Схема пространственного расположения датчиков экспериментальной установки показана на рис. 9, а на рис. 10 – фотографии двух типов блоков датчиков. Для измерения сигналов датчиков применяют стандартные аналогово-цифровые преобразователи, имеющие выход для связи с ЭВМ. Про-



а



б

Рис. 8. Временные зависимости температуры в разных точках бочки при затвердевании цементного компаунда (а); профиль температуры в различных сечениях бочки после 18 ч затвердевания в ней цементного компаунда (б)

граммное обеспечение этих преобразователей позволяет записывать результаты измерений в удобной для последующей обработки форме.

2.2. Оценка теплофизических характеристик контейнера долговременного хранения отвержденных РАО (бочки)

Для оценки теплофизических характеристик бочки на экспериментальной установке были выполнены опыты по замеру температурного поля в бочке в процессе остывания в ней нагретой до 90 °С воды.

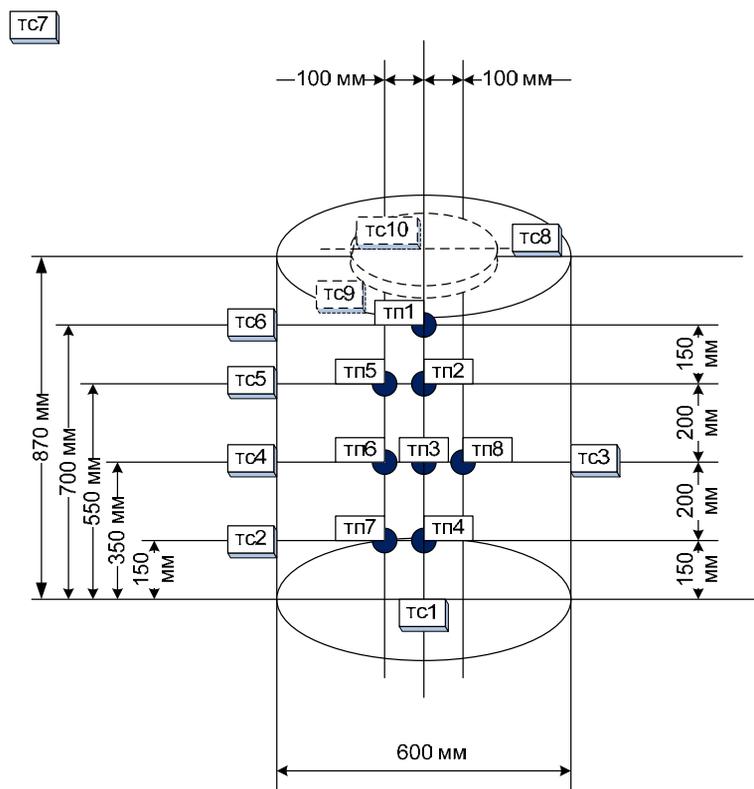


Рис. 9. Схема пространственного расположения датчиков в объеме контейнера и на его наружной поверхности



Рис. 10. Блок датчиков экспериментальной установки для измерения температуры во внутреннем объеме бочки

На рис. 11 представлены типичные кривые изменения температуры воды в бочке и температуры поверхностей теплообмена бочки с окружающей средой в процессе остывания воды в ней. Визуальный анализ кривых на рис. 11 показывает, что вода в бочке остывает равномерно по всему объему, перепад температуры между центром бочки и ее боковой поверхностью не превышает 1–2 градуса. Несомненно, это объясняется наличием мощных конвективных токов

в объеме бочки. Исключение составляет ход температуры в двух точках: на крышке бочки и на ее дне. Можно предположить, что больший перепад температуры между водой и крышкой обусловлен прослойкой воздуха в пространстве под крышкой, который ухудшает теплопередачу и уменьшает тепловой поток через крышку. В то же время в придонной части бочки конвекция подавлена и величина температурного градиента значительно ближе к расчетной по уравнению (8).

Математическая обработка экспериментальных точек замеров термодатчиков и построение обработанных данных в новых координатах « $\ln(T-T_0)$ – время», представленное на рис. 12, показывает, что данные в новых координатах хорошо укладываются на прямые линии.

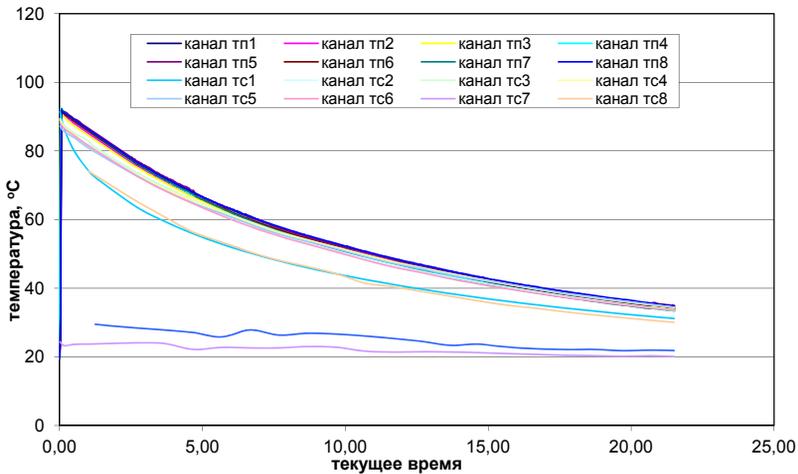


Рис. 11. Изменение температуры воды в бочке и на ее поверхности в процессе остывания в ней воды

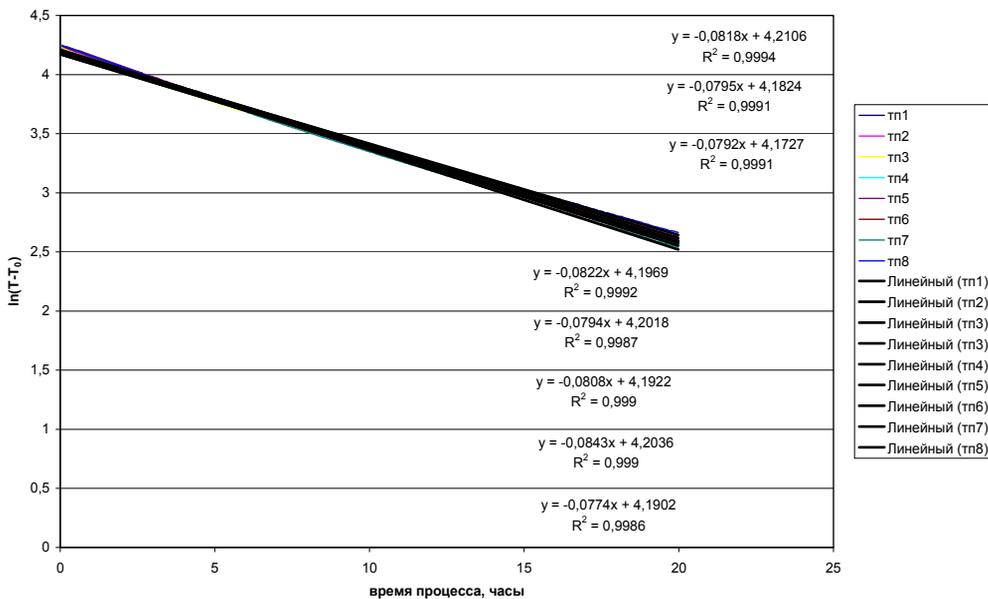


Рис. 12. Результаты математической обработки данных по охлаждению воды в бочке

Это позволяет сделать вывод о том, что охлаждение воды в бочке практически с самого начала опыта протекает в так называемом регулярном режиме [8, с. 265]. В этом режиме темп охлаждения постоянен для всех точек рассматриваемого объема и численно равен тангенсу угла наклона прямых на рис. 12, что математически можно записать как

$$-\frac{\partial[\ln(T - T_0)]}{\partial\tau} = m, \quad (16)$$

где m – темп охлаждения.

На основании равенства (16) и граничного условия третьего рода для тела любой формы можно написать следующее равенство, справедливое в стадии «регулярного режима» охлаждения:

$$c_p V \frac{d\bar{T}}{d\tau} = -\alpha S (T_n - T_0) = -c_p V (\bar{T} - T_0) m, \quad (17)$$

где \bar{T} – средняя по объему температура; T_n – температура поверхности охлаждения; S – площадь охлаждающей поверхности.

Из равенства (17) легко вычисляется усредненный коэффициент теплоотдачи для всей охлаждающей поверхности бочки. Вычисленный для данных, представленных на рис. 12, этот коэффициент оказался равным 9,86 Вт/м²·К, что почти в два раза больше, чем значение, вычисленное с помощью критериального уравнения (1). Значение полученного в ходе эксперимента усредненного коэффициента теплоотдачи позволяет уточнить расчеты по определению температурного поля в бочке с помощью численной модели, описанной в п. 1.3.

2.3. Оценка теплофизических характеристик процесса твердения цементного компаунда в бочке

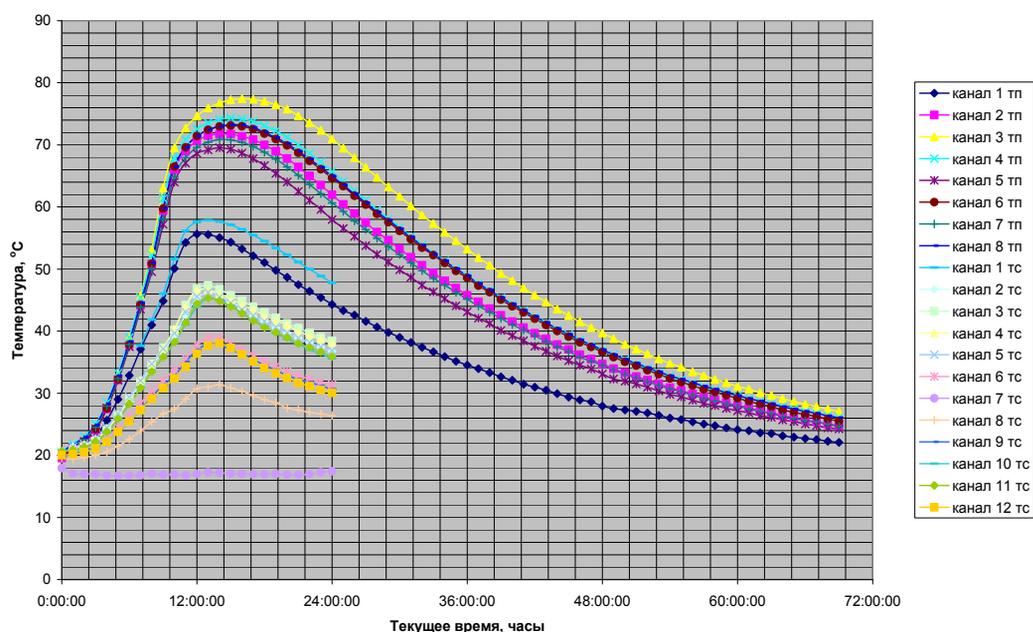
Для экспериментов по замеру температурного поля в процессе твердения цементного компаунда готовили цементный раствор с использованием портландцемента марки ПЦ-500 и имитатора пульпы – песка. В качестве глинистой сорбционной добавки использовали бентонит. Расчетные количества цемента, бентонита, песка и воды, которые необходимо загрузить в аппарат для получения 180 л цементного раствора, даны в табл. 1. Результаты экспериментов по замеру температурного поля в процессе твердения цементного компаунда указанных в табл. 1 составов изображены на рис. 13–14.

Как следует из представленных результатов, процесс твердения цементного компаунда при $V/B = 0,6$ сопровождается его существенным разогревом, температурный максимум которого, равный 77,5 °С, достигается через 1415 ч после заливки цементного раствора в бочку. Дальнейшее остывание продолжается в течение нескольких суток. Максимальный перепад температуры между центральными и периферийными зонами массива цементного компаунда, вычисленный по разнице показаний термопары **тп3** и термометра сопротивления **тс3**, достигает 35 градусов.

Цементный компаунд в бочке по показателю отношения площади ее поверхности к объему, используемому в технологии бетонных работ, относится к массивным бетонным конструкциям. Для исключения образования трещин термического характера технологическим

Таблица 1. Расчетные данные для экспериментов на системе цемент – бентонит – песок – вода

Компонентный состав вяжущего	ПЦ 500 (90 %) + бентонит (10 %)	
	Расчетное количество цементного раствора, л	180
Расчетное В/В соотношение	0,60	0,45
Расчетное количество вяжущего (цемент + бентонит), кг	195,1	233,0
Расчетное количество цемента, кг	175,6	209,7
Расчетное количество бентонита, кг	19,5	23,3
Расчетное количество исходной воды, л	117,1	104,8
Песок, кг	17,0	17,0
Весовое содержание отходов, % вес.	5,17	4,79
Общий вес компаунда, кг	329,2	354,8

Рис. 13. Изменение температуры цементного компаунда в процессе его затвердевания внутри бочки и на ее поверхности при $V/B = 0,6$

регламентом производства бетонных работ при сооружении массивных бетонных конструкций предусмотрен контроль следующих основных факторов, влияющих на термическую трещиностойкость конструкции:

- разность температур в теле конструкции, которая не должна превышать 20 °С;
- максимальная температура в ядре конструкции, которая не должна превышать 60 °С.

Сравнивая эти величины с полученным в ходе эксперимента значением, можно констатировать, что максимум температур и перепад превышают рекомендуемые на 15 градусов. Учитывая, что температурный максимум не превышает установленный для портландцемента

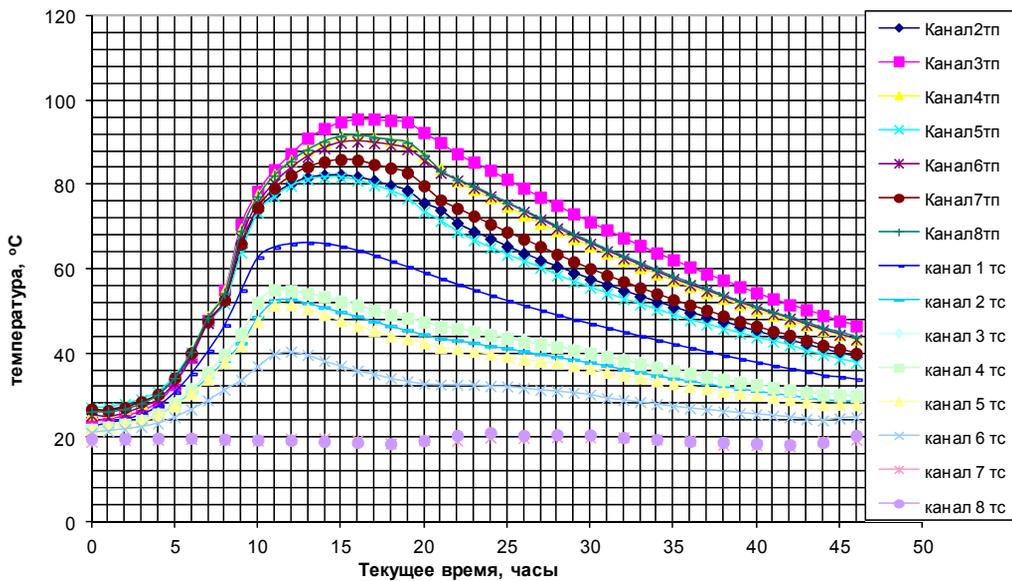


Рис. 14. Изменение температуры цементного компаунда в процессе его затвердевания внутри бочки и на ее поверхности при $B/B = 0,45$

максимум в $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, можно предполагать, что массового образования трещин термического характера в условиях проведения эксперимента происходить не будет.

Однако следует учитывать, что значение температурного максимума в первую очередь определяется содержанием цемента в компаунде. При водовяжущем отношении $0,6$ исходное содержание цемента в компаунде составляет 53% вес., в то время как при водовяжущем отношении $0,45$ исходное содержание цемента в компаунде увеличивается до 59% вес., или в $1,1$ раза. Очевидно, что при снижении водовяжущего отношения (B/B) до $0,45$ температурный максимум будет больше, соответственно возрастет перепад температуры между центральными и периферийными зонами массива цементного компаунда.

Для оценки влияния величины водовяжущего отношения был поставлен эксперимент по определению температурного поля в контейнере при твердении цементного компаунда с $B/B = 0,45$.

Результаты эксперимента по замеру температурного поля при твердении цементного компаунда с водовяжущим отношением $0,45$ показаны на рис. 14. Как и ожидалось, достигнутый в этом опыте температурный максимум, равный $95\text{ }^{\circ}\text{C}$, существенно выше опыта с водовяжущим отношением $0,6$. Максимальный перепад температуры между центральными и периферийными зонами массива цементного компаунда, вычисленный по разнице показаний термопары **тп3** и термометра сопротивления **тс3**, составляет 45 градусов. Очевидно, что при таком температурном максимуме и перепаде температур в массиве цементного компаунда возникают температурные напряжения, приводящие к образованию трещин.

Сравнимые результаты на рис. 15 демонстрируют, что величина водовяжущего соотношения оказывает большое влияние на температурное поле в бочке при твердении в ней цементного компаунда и без применения мер по снижению температурного максимума приведет к ухудшению качества цементного компаунда при водовяжущем отношении $0,45$.

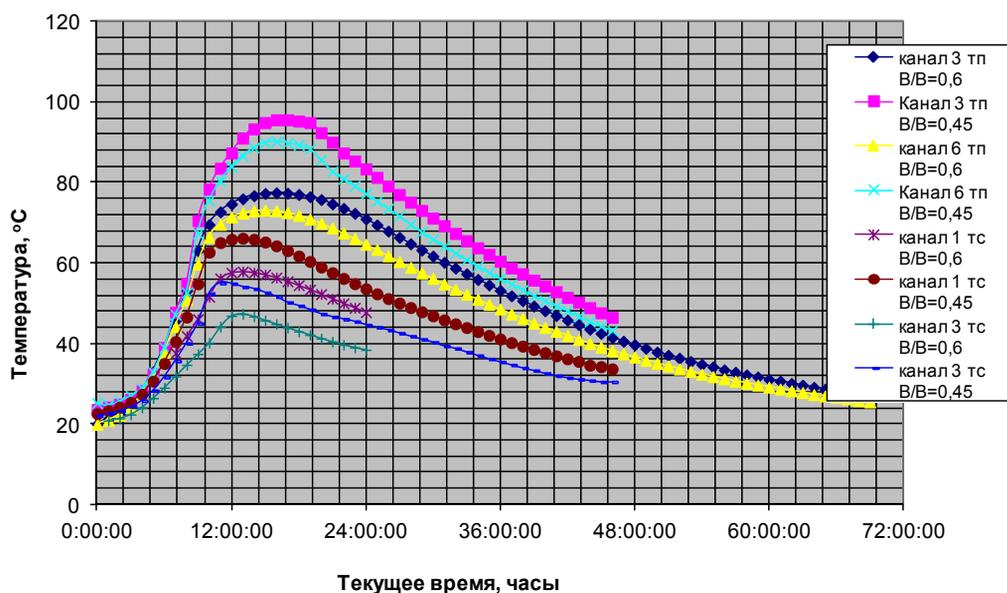


Рис. 15. Сравнение температуры в процессе затвердевания цементного компаунда в наиболее горячей точке внутри бочки **тп3**, в периферийной точке **тп6** и на боковой поверхности бочки в точке **тс3** при разных значениях водовяжущего соотношения

Полученные экспериментальные данные сравнили с результатами численного расчета по модели, описанной в п. 1.3. На рис. 16 представлены результаты экспериментальных замеров температур в процессе затвердевания цементного компаунда для трех точек: в наиболее горячей точке внутри бочки **тп3**, в периферийной точке **тп6** и на боковой поверхности бочки в точке **тс3** при разных значениях водовяжущего соотношения. Для этих же точек даны расчетные кривые.

Наибольшее совпадение расчета с экспериментом наблюдается для $V/B = 0,6$, где максимумы температуры различаются на 6 градусов. Для $V/B = 0,45$ максимальная расчетная температура превышает экспериментальную на 15 градусов. Наибольшее различие наблюдается для расчетной и экспериментальной температур на боковой поверхности бочки в точке **тс3**, оно составляет 40 градусов. Очевидно, что модель не учитывает особенностей процесса затвердевания цементного компаунда в области температуры, близкой температуре кипения воды. В то же время тепловой расчет бочки по модели, описанной в п. 1.3, может быть использован для $V/B \geq 0,5$ с достаточной для технических расчетов точностью.

Выводы

Экспериментально определен усредненный коэффициент теплоотдачи для всей охлаждающей поверхности бочки, оказавшийся равным $9,86 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, что почти в два раза больше значения, вычисленного с помощью общеизвестного критериального уравнения.

Существенный градиент температуры по сечению бочки в процессе теплообмена с окружающей средой в ходе длительного хранения, обусловленный выделением тепла при радио-

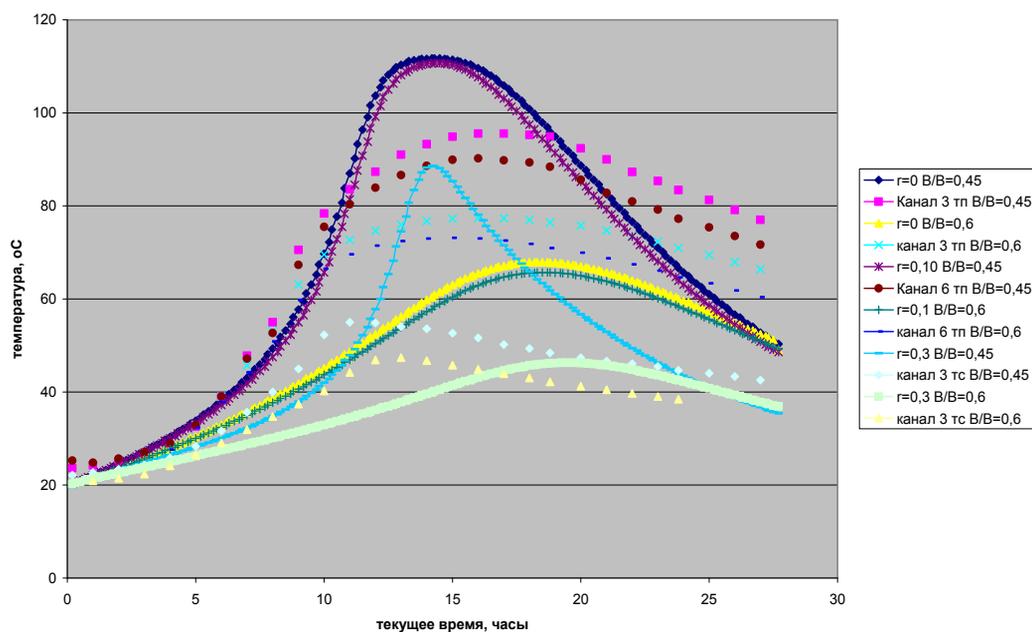


Рис. 16. Сравнение расчетной и экспериментально замеренной температуры в процессе затвердевания цементного компаунда в наиболее горячей точке внутри бочки **тп3**, в периферийной точке **тп6** и на боковой поверхности бочки в точке **тс3** при разных значениях водовяжущего соотношения

активном распаде содержащихся в цементном компаунде радионуклидов, может наблюдаться при значениях $q_v = 1000 \text{ Вт/м}^3$ и более.

Тепловой расчет контейнера для долговременного хранения РАО при цементировании неразстворимых остатков пульпы, извлеченных из емкостей-хранилищ, может быть выполнен по предложенной численной модели с достаточной для технических расчетов точностью в процессе твердения цементного компаунда в бочке при $V/B \geq 0,5$.

Список литературы

- [1] Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Портландцемент. М.: Стройиздат, 1974. 328 с.
- [2] ГОСТ 24316-80. Бетоны. Метод определения тепловыделения при твердении.
- [3] ГОСТ 310.5-88 Цемент. Метод определения тепловыделения
- [4] Шведов В.П., Седов В.М., Рыбальченко И.Л., Власов И.Н. Ядерная технология. М.: Атомиздат, 1979. 536 с.
- [5] ГОСТ Р 51883-2002. Отходы радиоактивные цементированные. Общие технические требования.
- [6] ГОСТ Р 51824-2001. Контейнеры защитные невозвратные для радиоактивных отходов из конструкционных материалов на основе бетона.
- [7] ГОСТ 30765-2001 Тара транспортная металлическая. Общие технические условия.
- [8] Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 525 с.
- [9] Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Л.: Химия, 1987. 576 с.

[10] Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. М.-Л.: ГЭИ, 1958. 418 с.

[11] Бутт Ю.М., Тимаев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М.: Высшая школа, 1973. 242 с.

[12] Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Киселева Ю.А. и др. // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 8. С. 20-22.

Calculation of Evaporation term Storage of Radioactive Waste

Vladislav A. Popkov^a,
Nikolay A. Naumenko^b and Tatiana A. Kulagina^c
^aFGUP «Mining and Chemical Combine»
53 Lenin Str., Zheleznogorsk, 662972, Russia
^bOAO «Engineering Center of Nuclear containers»
14 pl. Academician Kurchatov, Moscow, 123182, Russia
^cSiberian Federal University
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

The results of theoretical calculation of the temperature of the thermal field in the standard 200 – liter barrel for three different processes: cooling water and the cement compound, heat release of radioactive decay of radionuclides in the cement – rated compounds, hardening the cement compound. With the help of the numerical model has been shown that in the hardening cement compound internal volume Boch matches heated to 90 °C or more, and with respect to the central regions of overheating the peripheral is 25 to 30 degrees. Created on installation for direct measurement of the temperature field in the barrel and on the surface of its heat exchange with the environment assessed thermophysical characteristics of the barrel and the curing process of the cement compound. Calculated the average heat transfer coefficient for the entire cooling surface was equal to 9.86 barrels watt/m²·K, which is almost two times higher than the value calculated by conventional criteria equations. The intensity of heat in the process of hardening of the cement compound significantly increases with a decrease in $J/Q < 0.5$. It is shown that the proposed numerical model with sufficient accuracy for engineering calculations describes thermal processes raw occurring in the hardening cement compound in a barrel at the $J/Q \geq 0.5$.

Keywords: thermal calculations, temperature field, cementing, liquid radioactive waste, pulp, cement compounds.
