

К. т. н. **А. В. Заболотский**<sup>1</sup> (✉), к. т. н. **Л. М. Аксельрод**<sup>2</sup>, **Р. А. Донич**<sup>3</sup>,  
**Е. И. Поспелова**<sup>3</sup>, **Д. А. Марченко**<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ООО «Группа «Магнезит», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> ООО «Группа «Магнезит», Москва, Россия

<sup>3</sup> ООО «Группа «Магнезит», г. Сатка Челябинской обл., Россия

УДК 666.974.2:66.047.3

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВЛАГИ В ОГНЕУПОРНЫХ БЕТОНАХ И ТОРКРЕТ-МАССАХ ВО ВРЕМЯ СУШКИ

Построена математическая модель движения влаги в огнеупорных водозатворяемых материалах различной плотности при наличии внешнего температурного поля. Для решения задачи использованы уравнения теплопроводности Фурье, уравнение диффузии Фика и метод конечных элементов. Коэффициенты диффузии воды в исследованных материалах определены путем лабораторных испытаний по потере массы в процессе сушки образцов. В результате последующего вычислительного эксперимента определены особенности движения влаги в огнеупорных бетонах для случаев нанесения на холодную и горячую поверхности на примерах заливного дна сталеразливочного ковша и торкретирования промежуточного ковша.

**Ключевые слова:** бетоны, диффузия, метод конечных элементов.

### ВВЕДЕНИЕ

**В** металлургии распространено применение неформованных материалов, таких как торкрет-массы и огнеупорные бетоны, которые требуют предварительного смешивания с водой. Эти материалы часто применяются в рабочем слое футеровки агрегатов в непосредственном контакте с расплавленным металлом. Очевидно, что перед использованием из них необходимо удалять воду, т. е. высушивать. Сушка, как правило, проводится при 400–600 °С, режим сушки является компромиссным, учитываются рекомендации производителя огнеупоров и требования потребителя о сокращении времени подготовки агрегата к работе. При этом невозможно быть уверенным, что при существующей практике происходит полное или даже достаточное удаление воды, поскольку изредка наблюдается взрывное разрушение футеровки при первой плавке и достаточно часто присутствуют признаки выделения воды из футеровки при первых плавках, например повышенное содержание водорода в готовом продукте.

В связи с этим возникает необходимость разработки метода определения минимального времени и оптимального режима термообработки перед применением неформованных огнеупорных материалов для достаточного удаления влаги. Метод должен учитывать наряду со свойствами бетона или торкрет-массы (таким, например,

как скорость диффузии воды в материале) особенности расположения материала в футеровке, а также метод нагрева. Как правило, это односторонний нагрев с возможностью испарения воды только через нагреваемую поверхность.

Движущей силой диффузии воды в неравномерно нагретом твердом теле является перепад давления паров воды в его полостях, возникающий из-за разницы равновесного давления при разных температурах. На начальном этапе сушки водяные пары в равной мере выделяются из тонкого наружного слоя в атмосферу и выдавливаются в более глубокие слои футеровки. С течением времени наружный слой полностью высушивается, и влага из более глубоких слоев под действием перепада температур проникает все глубже, частично диффундирует к поверхности и испаряется. Таким образом, на определенном этапе, на котором зачастую процесс предварительного нагрева завершают, рабочая поверхность выглядит сухой и при лабораторных испытаниях также содержит незначительное количество влаги. Глубинные слои при этом могут иметь значительную влажность. При заливке металла в ковш рабочий слой футеровки быстро прогревается, в глубинных (влажных) слоях футеровки возникает значительное давление водяных паров, которое, с одной стороны, вызывает ускоренную диффузию к рабочей поверхности, а с другой — при неблагоприятных условиях может вызывать механическое разрушение футеровки.

В процессе сушки бетонов и торкрет-масс последовательно достигаются критические интервалы температуры. Во-первых, температура, при которой равновесное давление паров воды (в



А. В. Заболотский

E-mail: azabolotsky@magnezit.com

данном случае в процессе участвует химически не связанная вода) становится равным механической прочности материала. Необходимо отметить, что при температуре выше 100 °С равновесное давление водяного пара нарастает стремительно и около 180 °С достигает 1 МПа (около 10 ат). Зависимость равновесного давления водяного пара от температуры показана на рис. 1. Для разрушения бетонного изделия внутренним давлением водяного пара в зависимости от его микроструктуры и условий твердения достаточно давления пара от 0,5 до 2 МПа [2–5], температура при этом составляет 150–215 °С. Во-вторых, в интервале 150–550 °С происходит интенсивное разложение гидратов связующего с выделением химически связанной воды, причем положение пика этого разложения

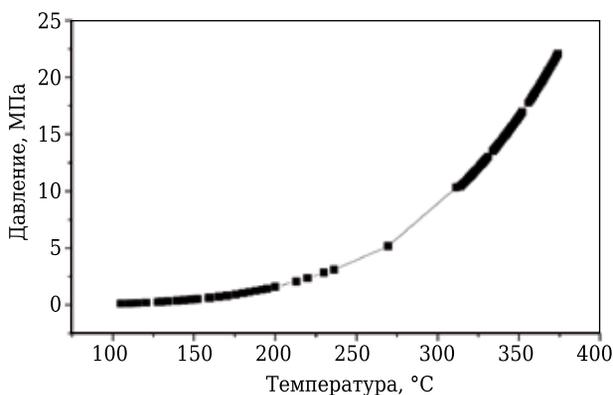


Рис. 1. Давление насыщенных паров воды в зависимости от температуры [1]

зависит от вида связующего, но в большинстве случаев приходится на 230–260 °С [6, 7].

Задача моделирования процесса сушки складывается из совместного решения задачи нагрева тела и задачи диффузии влаги в твердом теле. В предлагаемом исследовании эти задачи решались с применением разработанного авторами программного обеспечения, алгоритм которого основан на методе конечных элементов (FEM) [8]. При этом учитывалось, что в процессе сушки основные характеристики материалов (теплопроводность и теплоемкость) изменяются не только в соответствии с известными температурными зависимостями, но и за счет потери массы вследствие выделения паров воды, а также при изменении агрегатного состояния — переходе воды из жидкого состояния в газообразное.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Теплообмен в твердом теле описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \nabla^2 t + \frac{1}{c\rho} W, \quad (1)$$

где  $t$  — температура;  $\tau$  — время;  $\lambda$  — теплопроводность;  $c$  — теплоемкость;  $\rho$  — плотность;  $W$  —

мощность внутренних источников (стоков) тепла (в рассматриваемом случае — теплота химических реакций разложения гидратов вяжущего и тепловой эффект изменения агрегатного состояния воды),  $\nabla^2$  — оператор Лапласа:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \quad x, y, z — \text{декартовы координаты.} \quad (2)$$

В общем случае данное уравнение не имеет аналитического решения. В частных случаях такие решения получены для некоторых вариантов теплообмена, как правило для абстракций (бесконечное полупространство, бесконечный цилиндр и др.) или тел простой геометрической формы конечных размеров [9, 10]. Для реальных объектов это уравнение может быть решено одним из распространенных численных методов — от простых итерационных [11] до применения профессиональных программных пакетов, например ANSYS, ABAQUS и других, являющихся реализацией метода FEM.

Диффузия влаги в твердом теле в общем случае описывается уравнением Фика:

$$\frac{\partial p(\vec{R}, \tau, t)}{\partial \vec{R}} = (\nabla, D \nabla p(\vec{R}, \tau, t)) + f(\vec{R}, \tau), \quad (3)$$

где  $p$  — давление водяного пара;  $\vec{R}$  — направление;  $\tau$  — время;  $t$  — температура;  $D$  — коэффициент диффузии;  $f(\vec{R}, \tau)$  — функция, описывающая внутренние источники, связанные с разложением гидратов вяжущего, или стоки, связанные с удалением водяного пара за пределы твердого тела массы;  $\nabla$  — оператор Гамильтона:  $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ .

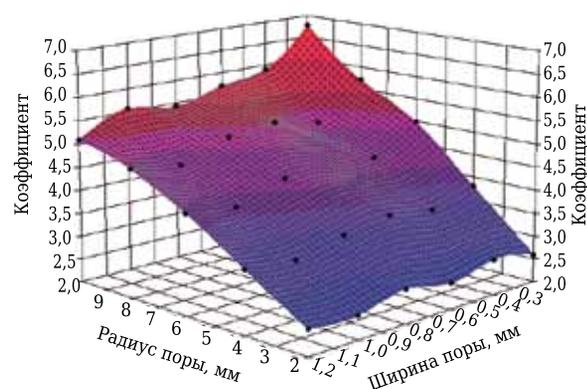
Таким образом, моделирование сушки бетона может быть осуществлено совместным решением уравнений (1) и (3). При решении необходимо учитывать, что в процессе сушки непрерывно изменяется температурное поле (нестационарный режим) и поле влажности изделия, что, в свою очередь, приводит к изменению теплопроводности, теплоемкости, плотности и давления водяных паров в различных зонах объекта. Это, в свою очередь, также оказывает влияние на температурное поле и влажность.

Дополнительную сложность вызывает определение коэффициента диффузии воды в материале. В настоящем исследовании этот параметр был определен экспериментальным путем. Было проведено исследование потерь массы образцами бетона при определенных температурах с последующим компьютерным моделированием сушки этих образцов, в ходе которого путем последовательных приближений вычисляли коэффициент диффузии. Работа была выполнена в лаборатории ООО «Группа «Магнезит» (г. Сатка Челябинской области).

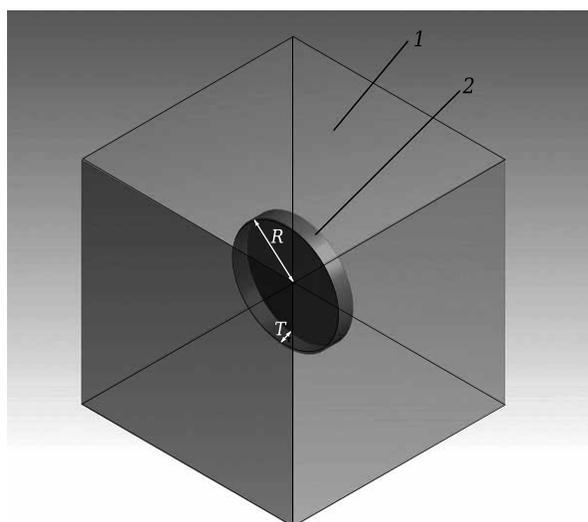
В общем случае диффузия влаги при сушке бетонов происходит путем нескольких механизмов: сорбции – десорбции влаги компонентами связующего, движением влаги в порах (трещинах) под действием капиллярных явлений и сво-

бодного испарения в крупных порах, имеющих выход на поверхность изделия. Для точного моделирования требуется учитывать вклад всех этих процессов в перемещение влаги в изделии. Однако такая модель требует детального исследования микроструктуры материала и ее изменения в процессе эксплуатации футеровки, что затруднительно в условиях реального производства. Поэтому для расчетов применяли некий усредненный коэффициент, вычисленный в ходе эксперимента, в котором одновременно реализуются все перечисленные механизмы диффузии.

При выполнении расчетов можно также оценить вероятность разрушения изделия под действием либо термомеханических напряжений, вызываемых термическим расширением материала объекта, либо давления водяного пара во внутренних полостях изделия. При моделировании разрушения под давлением водяного пара необходимо использовать в качестве критерия прочность на раскалывание образца [3]. К сожалению, данное испытание не является стандартным для



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента усиления напряжений для щелевых пор от геометрии щелевой поры



**Рис. 3.** Схема щелевой поры в материале, применявшаяся для расчетов: 1 — твердая матрица; 2 — пора

огнеупорных бетонов, поэтому в рамках исследования было проведено моделирование усиления напряжений на порах различных геометрической формы и размеров с целью дальнейшего использования в расчетах результатов измерения предела прочности материала при изгибе.

Исследование проводили путем расчетов при помощи программного обеспечения ANSYS 15R, лицензией на использование которого обладает ООО «Группа «Магнезит». В результате вычислительного эксперимента установили, что поры правильной сферической формы независимо от диаметра приводят к усилению напряжений ориентировочно в 1,5 раза, а часто встречающиеся в бетонах щелевые поры длиной в несколько миллиметров и шириной в несколько десятков микрометров могут усиливать напряжения более чем в 7 раз. На рис. 2 показана поверхность коэффициента усиления напряжений в зависимости от геометрии щелевой поры, полученная в результате проведенного исследования. При этом принималось, что пора имеет форму диска. На рис. 3 приведена схема щелевой поры.

Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными других исследователей. Типичная величина предела прочности при изгибе огнеупорных бетонных изделий, полученная лабораторией «Группы «Магнезит», около 10 МПа, что соответствует предельно допустимому механическому напряжению для тонких щелевых пор 0,5–2,0 МПа, при этом в литературе встречаются данные о прочности при раскалывании на уровне 1–2 МПа [3].

Для решения задачи был выбран метод конечных элементов (FEM), реализованный авторским коллективом в виде компьютерной программы, алгоритм работы которой кратко может быть выражен в виде последовательности действий:

1. Расчет нестационарного температурного поля объекта начиная с момента начала нагрева с постоянным приращением по времени.
2. Определение равновесного давления водяного пара для всех областей объекта.
3. Проверка возможности образования трещины. Данный пункт алгоритма критичен, поскольку моделирование движения влаги имеет практический смысл, только если изделие не разрушается.
4. Расчет движения влаги в объекте в соответствии с выражением (3).
5. Уточнение теплопроводности, теплоемкости и влажности всех участков объекта.
6. Возврат к пункту 1 алгоритма.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперимент проводили в два этапа. На первом (лабораторном) этапе был определен коэффициент диффузии в бетонах и торкрет-массах. На втором (вычислительном) этапе моделировалось

движение влаги в бетонном изделии в температурном поле, соответствующем реальным условиям сушки.

При определении коэффициента диффузии исследовали неформованные огнеупоры — торкрет-массы и бетоны плотностью от 1,6 до 3,4 г/см<sup>3</sup>. Полученные результаты представлены на рис. 4 в виде зависимости коэффициента диффузии воды в материале от его плотности. Для расчета коэффициента диффузии применяли разработанную авторским коллективом оригинальную методику, основанную на статистической обработке данных о потере массы образцами бетона в процессе сушки при постоянной температуре в печи с последующим математическим моделированием для подбора коэффициентов диффузии.

Данная зависимость является справочной, поскольку скорость диффузии зависит не только от плотности, но, в частности, и от химической природы материала. В общем случае материалы одинаковой плотности, но различной природы могут иметь разные коэффициенты диффузии. В настоящем исследовании в качестве образцов использовали корундовые и магниальные бетоны плотностью более 2,9 г/см<sup>3</sup> и магниальные торкрет-массы плотностью 1,6–1,8 г/см<sup>3</sup>.

Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными, в которых результаты измерения коэффициента диффузии воды в бетонах приводятся на уровне  $10^{-10}$ – $10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с [12]. Полученные значения коэффициентов диффузии были использованы для моделирования движения влаги в реальных футеровках при одностороннем нагреве.

В эксперименте определяли также максимальные потери массы, которые происходят при выдержке образцов при постоянных температурах в интервале 120–600 °С. Эту информацию впоследствии использовали при моделировании источников влаги за счет разложения гидратов вяжущего. В отдельных случаях с этой же целью применяли результаты дифференциально-термического анализа.

В общем случае огнеупорная футеровка представляет собой многослойную стенку, состоящую из материалов различной плотности, химической стойкости и теплопроводности. В совокупности материалы футеровки обеспечивают максимальную стойкость рабочей поверхности агрегата, а также минимальную температуру на поверхности кожуха и наиболее низкую стоимость всей футеровки. Как правило, стенка агрегата состоит из 3–5 слоев: рабочего, имеющего непосредственный контакт с обрабатываемой средой (металлом, шлаком); буферного в виде засыпки из огнеупорного порошка, выполняемого для компенсации термического расширения окружающих изделий; арматурного, выполненного из огнеупорного бетона или ша-

мотного кирпича; теплоизоляционного и непосредственно металлического кожуха агрегата. Неформованные огнеупоры (бетоны) обычно применяют в рабочем слое, вследствие чего для сушки материала можно использовать только одну свободную поверхность, т. е. применяется односторонний нагрев. В редких случаях из бетонов изготавливают крупные блоки, которые могут быть высушены в специальных сушилах с применением всестороннего нагрева.

В настоящем исследовании в качестве объектов моделирования для вычислительного эксперимента были выбраны дно сталеразливочного ковша и футеровка промежуточного ковша.

Дно сталеразливочного ковша, представляющее собой трехслойную стенку: рабочий слой из огнеупорного бетона толщиной 300 мм, арматурный слой толщиной 100 мм и металлический кожух. Коэффициент диффузии воды в бетоне рабочего слоя плотностью 2,9 г/см<sup>3</sup> составляет  $7,7 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с, в арматурном слое —  $4,8 \cdot 10^{-10}$  м<sup>2</sup>/с. Количество воды затворения для бетона 5,5 мас. %. Металлический кожух непроницаем для воды, но в нем имеются выпарные отверстия для удаления влаги. Кроме того, влага может скапливаться в пространстве между арматурным слоем и кожухом. В ходе эксперимента вычисляли суммарное количество влаги, удаляемой через выпарные отверстия и накапливающейся вблизи кожуха.

Футеровка промежуточного ковша, состоящая из торкрет-массы (в рабочем слое толщиной 100 мм) плотностью 1,9 г/см<sup>3</sup> (коэффициент диффузии  $9,1 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с), а также арматурного слоя толщиной 100 мм и волокнистой теплоизоляции, диффузию воды в которой не определяли, так как считалось, что вода, проникающая через арматурную футеровку, накапливалась в теплоизолирующем слое. Исходная влажность торкрет-массы принималась равной 20 мас. %.

На рис. 5 приведены графики сушки для огнеупорного бетона. Согласно полученным результатам при одностороннем нагреве вода частично выделяется через горячую поверхность

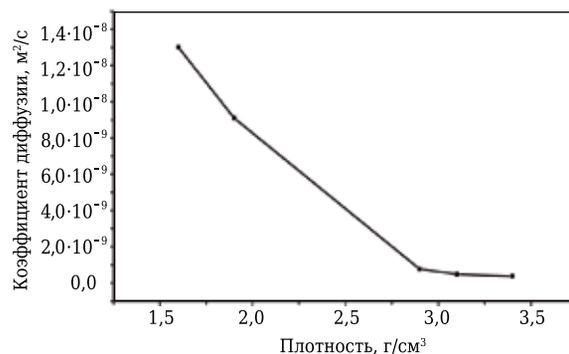


Рис. 4. Экспериментальная зависимость коэффициента диффузии воды от плотности бетона

футеровки, а частично диффундирует внутрь материала. Механизм диффузии можно представить следующим образом: при нагреве вместе с температурой возрастает равновесное давление воды в поверхностном (рабочем) слое бетона, влага, соответственно, перемещается под действием этого давления во всех направлениях. Однако перемещение влаги внутрь футеровки и вдоль слоя с одинаковым давлением (параллельно рабочей поверхности футеровки) затруднено, поскольку противодействует давление влаги в этих направлениях перемещения. Таким образом, преимущественным является направление движения влаги к горячей поверхности, где давление минимально. Возможно также выдавливание влаги в арматурную футеровку, где нет влаги для создания существенного давления. На рис. 5, а можно наблюдать, что по границе сухого и влажного материала образуется тонкий слой, влажность которого превышает первоначальную. При этом толщина слоя сухого материала увеличивается.

На границе с арматурным слоем происходит диффузия влаги из рабочего слоя в арматурный. На рис. 5, в представлен график количества воды, прошедшей через арматурный слой за время сушки бетона. При первоначальном общем содержании влаги в рабочей футеровке толщи-

ной 300 мм около 30 кг/м<sup>2</sup>, сквозь арматурный слой за 29 ч проходит около 12 кг/м<sup>2</sup>. На рис. 5, б показано изменение содержания влаги в арматурном слое с течением времени. В отдельные моменты содержание влаги в арматурном слое может достигать 1 мас. %. При этом существенный рост количества влаги, прошедшей сквозь арматурный слой, начинается после 10–15 ч термообработки, что соответствует времени диффузии влаги в арматурном слое. Режим нагрева футеровки, для которого построены графики рис. 5, показан на рис. 6.

В случае сушки торкрет-массы наблюдается несколько иная картина движения влаги в футеровке. Различие вызвано двумя основными причинами — более низкой плотностью торкрет-массы по сравнению с плотностью бетона, что обуславливает более высокое значение коэффициента диффузии, а также тем, что торкрет-массу наносят на горячий арматурный слой, температура поверхности которого, как правило, на момент торкретирования составляет около 80 °С.

На рис. 7 приведены графики движения влаги при сушке торкрет-массы. Аналогично сушке огнеупорного бетона на границе между сухим и влажным материалом образуется тонкий слой, в котором влажность материала превышает первоначальную. Иначе, чем в бетоне, происходит движение влаги на границе торкрет-массы и арматурного слоя. На начальном этапе сушки, пока температура торкрет-массы не превысит температуру арматурного слоя (2,5–3,0 ч), движение влаги в арматурный слой незначительно, поскольку равновесное давление водяного пара в поверхностном слое арматуры превышает давление в пограничном слое торкрет-массы. В результате образуется препятствие движению влаги, причем влага, попадающая в арматурный слой, сравнительно быстро проникает сквозь него за счет разности температур внутри арматуры (рис. 7, в).

Когда температура пограничного слоя торкрет-массы превысит температуру поверхно-

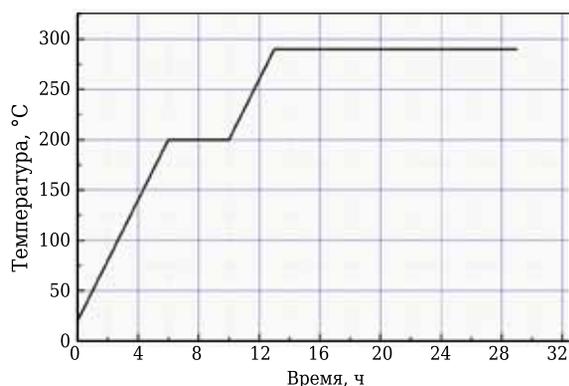


Рис. 6. Режим нагрева бетонной футеровки

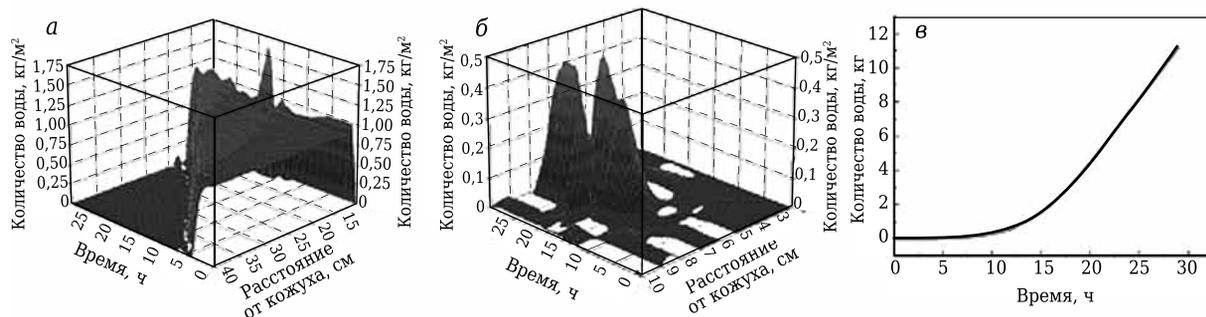


Рис. 5. Движение влаги при сушке огнеупорного бетона (а) и арматурной футеровки (б): а — изменение влагосодержания в бетоне (вертикальная ось отградуирована в массовом количестве воды, содержащейся в слое футеровки толщиной 1 см площадью 1 м<sup>2</sup>), слой бетона начинается с расстояния 10 см; б — изменение влагосодержания в арматурном слое; в — выделение воды за пределы арматурной футеровки (в пересчете на 1 м<sup>2</sup>)

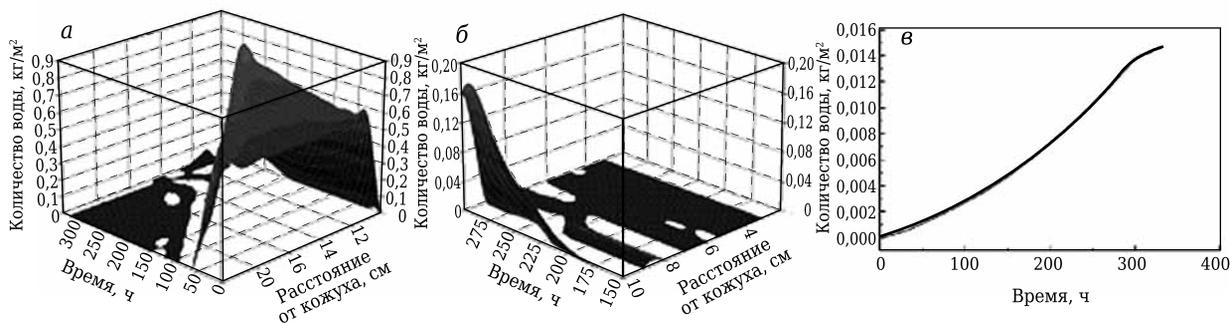


Рис. 7. Движение влаги при сушке торкрет-массы. Обозначения те же, что на рис. 5

сти арматуры, движение воды становится более интенсивным (рис. 7, б). Однако количество проникающей в арматурный слой воды значительно меньше, чем в случае с плотным бетоном. Это вызвано разностью коэффициентов диффузии воды в рабочем и арматурном слоях: у плотного огнеупорного бетона коэффициент диффузии воды близок по величине к коэффициенту диффузии в арматурном слое, а в торкрет-массе он значительно выше. Соответственно, диффузия в арматурном слое существенно затруднена по сравнению с диффузией в торкрет-массе. Также за счет более высокого коэффициента диффузии время сушки торкрет-массы составляет около 5 ч против 29 ч для бетона, а температура сушки торкрет-массы 130 °С против 250–300 °С для бетона. Все эти факторы приводят к тому, что за время сушки сквозь арматурный слой при сушке бетона проникает около 12 кг/м<sup>2</sup> воды, при сушке торкрет-массы всего лишь около 0,015 кг/м<sup>2</sup>, т. е. на 3 порядка меньше.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время сушки неформованных огнеупоров вследствие геометрических особенностей оборудования в большинстве случаев применяется односторонний нагрев футеровки. В результате проведенного математического моделирования процесса установлено, что влажность материала при этом изменяется резко неравномерно — образуется пограничный слой между влажным и полностью просушенным материалом, влажность которого незначительно превышает этот показатель исходного материала. Движение влаги в футеровке в основном происходит в направлении нагреваемой поверхности, поскольку движущей силой процесса является равновесное давление водяного пара, затрудняющее переме-

шение влаги в направлении влажных областей футеровки.

Скорость сушки материала определяется коэффициентом диффузии в нем воды, который может быть определен экспериментально. В рассмотренных модельных случаях плотного огнеупорного бетона и торкрет-массы коэффициенты диффузии различались приблизительно на порядок, величины расчетного времени сушки, необходимые для удаления воды из рабочего слоя футеровки, — в 5–7 раз. При этом коэффициент диффузии в арматурном слое был одного порядка с коэффициентом диффузии плотного бетона и, соответственно, существенно превышал этот коэффициент для торкрет-массы. Как следствие, в процессе сушки бетона значительная часть воды (около 40 % от общего количества) проникала в арматурный слой. При сушке торкрет-массы сквозь арматурный слой проникало всего около 0,2 % общего количества воды.

Через некоторое время после начала сушки нагреваемая поверхность материала выглядит сухой, прекращается видимое выделение водяного пара. Однако глубинные слои футеровки при этом содержат значительное количество влаги, которое может быть определено в том числе математическими методами. В случае начала эксплуатации оборудования в такой момент времени может развиться аварийная ситуация вследствие возникновения давления водяного пара во внутренних полостях (порах) материала. При превышении давлением механической прочности материала происходит взрывное разрушение футеровки. Другой причиной аварийной ситуации (или снижения качества металла за счет повышения содержания водорода) может оказаться выделение паров воды в расплав металла вследствие продолжающейся диффузии влаги в направлении горячей поверхности футеровки.

## Библиографический список

1. Волков, А. И. Большой химический справочник / А. И. Волков, И. М. Жарский. — Минск : Современная школа, 2005. — 608 с.
2. Ramal Jr., F. T. Water content and its effect on the drying behavior of refractory castables / F. T.

Ramal Jr., R. Salomao, V. C. Pandolfelli // Refractories Applications and News. — 2005. — Vol. 10, № 3. — P. 10–13.

3. Salomao, R. The particle size distribution effect on the drying efficiency of polymeric fibers containing

castables / R. Salomao, V. C. Pandolfelli // Ceramics International. — 2008. — № 34. — P. 173–180.

4. **Cardoso, F. A.** Effect of curing time on the properties of CAC bonded refractory castables / F. A. Cardoso, M. D. M. Innocentini, M. M. Akyoshi, V. C. Pandolfelli // J. Europ. Ceram. Soc. — 2004. — № 24. — P. 2073–2078.

5. **Bell, D. A.** First heat up of ladle linings / D. A. Bell // Proceedings of the Unified International Technical Conference on Refractories (UNITECR'99), 1999, Berlin, Germany. — P. 292–294.

6. **Шевченко, В. А.** Технология и применение специальных бетонов : уч. пособие / В. А. Шевченко. — Новосибирск : Сибирский федеральный университет, 2015. — 115 с.

7. **Баженов, Ю. М.** Технология бетона : учебник / Ю. М. Баженов. — М. : АСВ, 2003. — 500 с.

8. **Сегерлинд, Л.** Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. — М. : Мир, 1979. — 392 с.

9. **Карслоу, Г.** Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. — М. : Наука, 1964. — 488 с.

10. **Лыков, А. В.** Теория теплопроводности : уч. пособие / А. В. Лыков. — М. : Высшая школа, 1967. — 600 с.

11. **Заболотский, А. В.** Математическое моделирование термостойкости оксида магния / А. В. Заболотский // Новые огнеупоры. — 2011. — № 6. — С. 90–98.

12. **Кравцова, О. Н.** Влагоперенос в бетонах с различным содержанием противоморозной добавки / О. Н. Кравцова, Е. Г. Старостин, А. М. Тимофеев // Известия Самарского научного центра РАН. — 2012. — Т. 14, № 4 (5). — С. 1250–1252. ■

Получено 11.05.16

© А. В. Заболотский, Л. М. Аксельрод, Р. А. Донич, Е. И. Поспелова, Д. А. Марченко, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



Международная специализированная выставка  
**ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ. ИНВЕСТИЦИИ**  
 (NI-TECH)

14–16 марта 2017 г.  
 Экспофорум, Санкт-Петербург



**ПЕТЕРБУРГСКАЯ  
 ТЕХНИЧЕСКАЯ  
 ЯРМАРКА**

Международная выставка-конгресс «Высокие технологии. Инновации. Инвестиции» (NI-TECH) — одно из первых мероприятий России в области продвижения высоких технологий, инноваций и инвестиционных проектов в научно-технической сфере. Выставка-конгресс способствует эффективному взаимодействию научных организаций и потенциальных инвесторов. Традиционно основными экспонентами являются государственные научные центры, научно-исследовательские институты, вузы, промышленные предприятия, технопарки и региональные экспозиции, которые демонстрируют свои инновационные достижения.

**Тематические разделы выставки**

- Специализированный раздел: **НАНОТЕХНОЛОГИИ**  
 Наноматериалы и нанотехнологии  
 Оборудование, технологии, оснастка для производства наноматериалов  
 Применение нанотехнологий и наноматериалов
- **ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**
- **ИННОВАЦИИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**  
 Машиностроение  
 Металлургия  
 Литейное производство  
 Автомобилестроение  
 Энергетика и энергосбережение  
 Химия и новые материалы
- **ИНВЕСТИЦИИ**

По вопросам участия в выставке обращаться:

Ирина Степанывева

Тел./факс: +7 (812) 320-80-94

E-mail: port@restec.ru