

*Романько Я.В. – ассистент, НМетАУ*

*Решетняк С.И. – канд. техн. наук, доц., НМетАУ*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СУШКИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША С МОНОЛИТНОЙ ФУТЕРОВКОЙ

*Приведены результаты исследования сушки промежуточного ковша с монолитной футеровкой с помощью математической модели. Получены зависимости изменения температуры, влагосодержания и давления в порах бетона в процессе тепловой обработки.*

### Введение

Комплексная модель сушки промежуточных ковшей была рассмотрена в работе [1]. Она использует допущение, что водяной пар и неиспарившаяся вода внутри бетонной стенки находятся в равновесном состоянии [2, 3]. Известным недостатком такой модели является возможность появления в решении нефизических осцилляций при перемещении влаги, что является характерным для классического уравнения Ричардсона для ненасыщенного течения [4]. С целью устранения этой проблемы будем использовать представление уравнения переноса влаги в смешанной форме, аналогично задачам фильтрации, но для неизотермических условий. Такой подход позволит применить комплексную математическую модель для широкого диапазона режимов сушки промежуточных ковшей.

### Модель сушки

Уравнения процессов переноса массы и тепла по толщине стенки можно записать в следующей смешанной форме:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial S} \left( \frac{a}{g} \frac{\partial P}{\partial S} \right) + \hat{W}_d \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial S} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial S} \right) + C_a \frac{\partial W}{\partial \tau} - C_w \frac{a}{g} \frac{\partial P}{\partial S} \frac{\partial T}{\partial S}, \quad (2)$$

где  $W$  – содержание свободной воды в единице объема;  $\hat{W}_d = \partial W_d / \partial T$  – изменение удельного содержания воды, освобождаемой дегидратацией;  $a$  – относительная проницаемость бетона;  $g$  – ускорение свободного падения;  $P$  – давление в порах бетона;  $T$  – тем-

пература;  $\tau$  – время;  $S$  – координата, направленная по нормали к стенке;  $\rho$ ,  $C$  и  $\lambda$  – плотность, теплоемкость и теплопроводность бетона;  $C_a$  – тепло испарения свободной воды;  $C_w$  – теплоемкость воды.

Эти два уравнения содержат три неизвестных величины –  $W$ ,  $P$  и  $T$ , поэтому для замыкания системы должна использоваться зависимость  $W = W(P, T)$  [3]. Для их решения применяем метод контрольного объема [5, 6]. В результате на каждом временном слое  $n+1$  необходимо решать систему нелинейных уравнений относительно неизвестных температур  $T_i^{n+1}$ , влажности  $W_i^{n+1}$  и давлений  $P_i^{n+1}$  в узлах сетки ( $i = 1, 2, \dots, N_c$ ). Для внутренних узлов сетки эта система принимает следующий вид:

$$\left( W_i^{n+1, \kappa+1} - W_i^n \right) \Delta S = \left( \frac{a_{i+1/2}^{n+1, k} P_{i+1}^{n+1, \kappa+1} - P_i^{n+1, \kappa+1}}{g \Delta S} - \frac{a_{i-1/2}^{n+1, k} P_i^{n+1, \kappa+1} - P_{i-1}^{n+1, \kappa+1}}{g \Delta S} \right) \Delta \tau + \quad (3)$$

$$+ \hat{W}_{di}^n (T_i^{n+1, \kappa} - T_i^n) \Delta S$$

$$\rho C (T_i^{n+1, \kappa+1/2} - T_i^n) \Delta S = \left[ \lambda \frac{T_{i+1}^{n+1, \kappa+1/2} - T_i^{n+1, \kappa+1/2}}{\Delta S} - \lambda \frac{T_i^{n+1, \kappa+1/2} - T_{i-1}^{n+1, \kappa+1/2}}{\Delta S} \right] \Delta \tau + \quad (4)$$

$$+ C_{ai}^n (W_i^{n+1, \kappa} - W_i^n) \Delta S - \left[ C_w \frac{a_i^{n+1, \kappa}}{4 \Delta S g} (P_{i+1}^{n+1, \kappa} - P_{i-1}^{n+1, \kappa}) (T_{i+1}^{n+1, \kappa+1/2} - T_{i-1}^{n+1, \kappa+1/2}) \right] \Delta \tau$$

где  $\Delta S$  – шаг по координате,  $\Delta \tau$  – шаг по времени,  $\kappa$  – номер текущей итерации,  $\kappa + 1/2$  – промежуточная итерация для расчета текущих значений температур.

Для решения полученной системы уравнений применяем итерационный метод Пикарда [4], согласно которому все величины, рассчитываемые на новой итерации  $\kappa + 1$ , разлагаются в усеченный ряд Тейлора:

$$W_i^{n+1, \kappa+1} = W_i^{n+1, \kappa} + \left( \frac{\partial W}{\partial P} \right)^{n+1, \kappa} \Delta P_i^k; \quad (5)$$

$$P_i^{n+1, \kappa+1} = P_i^{n+1, \kappa} + \Delta P_i^k. \quad (6)$$

Получаемые уравнения решаются методом прогонки относительно поправок  $\Delta P_i^k$  после чего с помощью (5) и (6) находятся содержание влаги и давление в узлах на итерации  $\kappa + 1$ . Затем прогонкой решаются уравнения (4) относительно температур в узлах. Итерационный процесс продолжается, пока значение поправок не станет меньше заданного малого числа  $\varepsilon$ . После этого происходит переход на новый временной слой  $n+1$ , и расчет продолжается далее аналогичным образом.

### Моделирование сушки промежуточного ковша

При помощи математической модели проводились исследования сушки шести- и семиручьевого промежуточных ковшей [1,7]. Рабочий слой промковша и его крышка имеют толщину 150 мм и изготавливаются из низкоцементной алюмосиликатной массы, содержащей  $Al_2O_3 > 70\%$ ,  $SiO_2 < 25\%$ ,  $Fe_2O_3 < 3\%$ .

На рис. 1 показана схема расположения на поверхности футеровки промковша точек контроля давления в порах бетона в процессе его сушки. Точки 1, 2 и 3 располагаются на поду на линии расположения горелок, начиная от оси крайней горелки с шагом  $\delta = \Delta/4$ . Точки 4, 5 и 6 размещены аналогично, но на широкой боковой стенке.

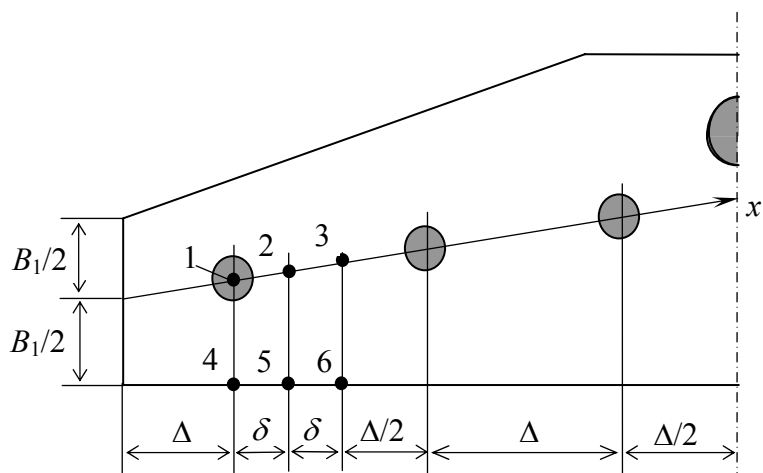


Рис. 1. Схема расположения точек контроля давления в порах бетона

Так как скорость разогрева различна в разных участках футеровки, то для общности вначале выполнено моделирование этого процесса при постоянном расходе топлива  $B_m = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$  и коэффициенте расхода воздуха  $n = 4$ . На рис. 2 приведено изменение давления пара в процессе сушки на различной глубине стенки в точке 1, расположенной под крайней горелкой.

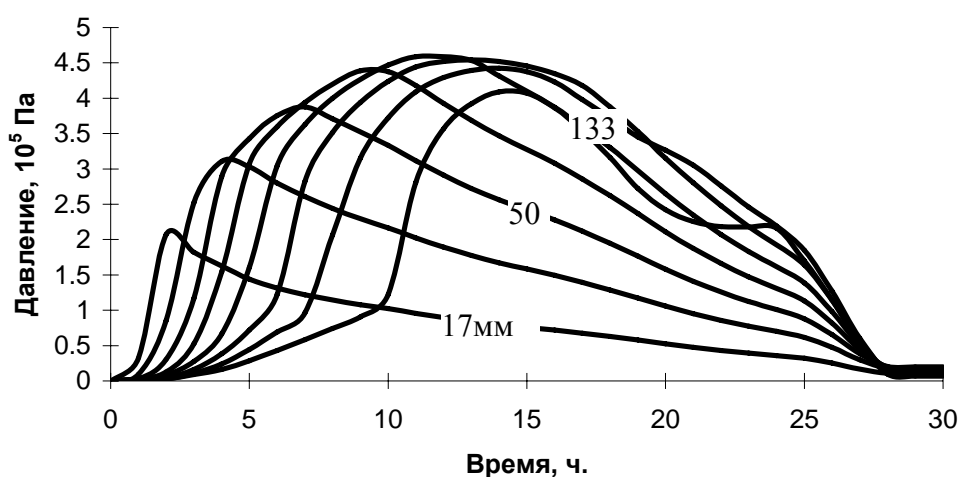


Рис. 2. Изменение давления в процессе сушки на различной глубине стенки пода под крайней горелкой (точка 1)

Очевидно, что после начала работы стенда сушки давление вначале заметно повышается в точках ближе к внутренней поверхности стенки, а затем по мере продвижения фронта сушки увеличивается и в точках, расположенных ближе к наружному краю. Для рассматриваемого случая наибольшее давление 0,45 МПа достигается на глубине 84 – 100 мм от внутренней поверхности между 11 и 13 часами сушки. Эта величина еще не превышает опасного значения, способного вызвать взрывное растрескивание бетона в процессе его сушки [2].

Изменение общего влагосодержания стенки в точке 1, расположенной под горелкой, показано на рис. 3.

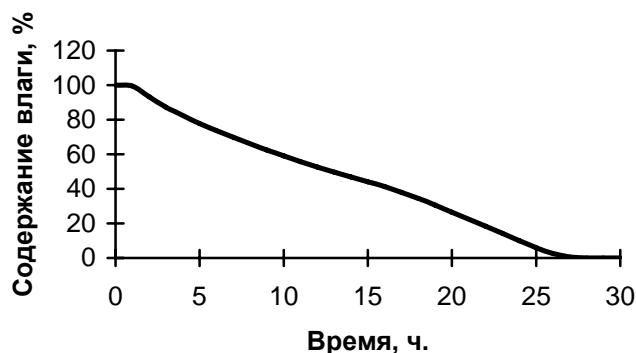
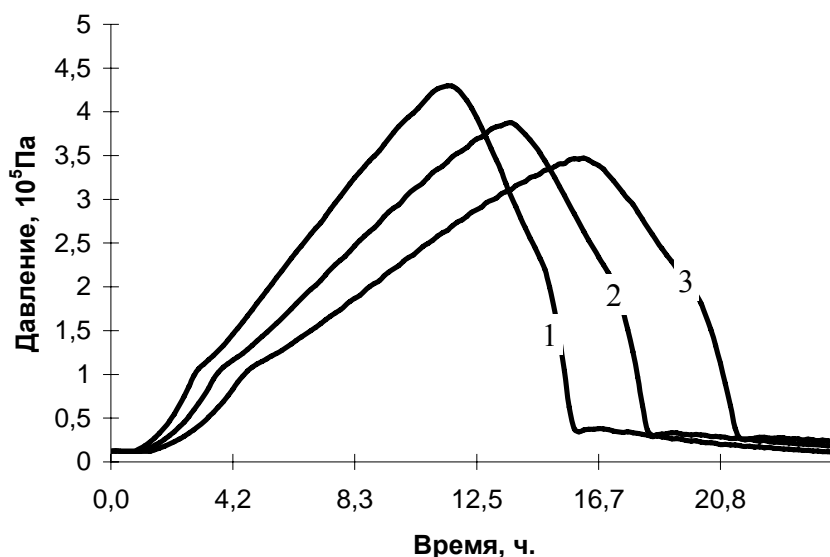


Рис. 3. Изменение общего влагосодержания стенки под горелкой (точка 1), в процессе сушки

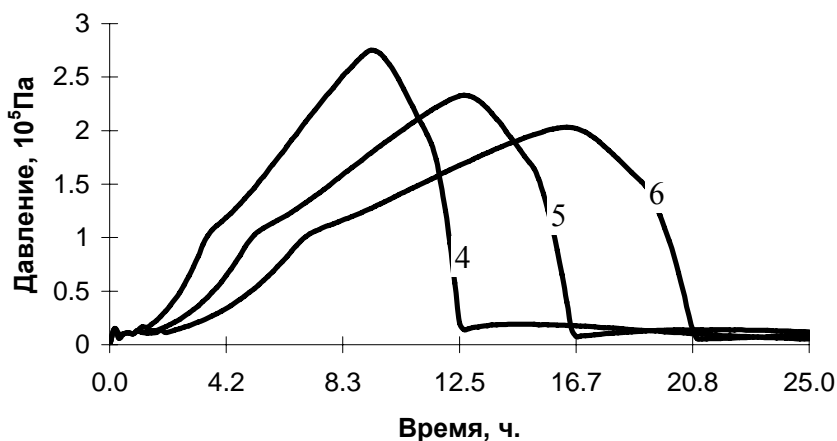
В первые полтора часа удаление влаги протекает очень медленно. За это время удаляется всего 0,5 % общего количества воды, в то время как в последующие 3,5 часа удаляется 23 % влаги из бетона.

Изменение максимального давления пара внутри футеровки в процессе сушки для точек 1 – 6 показано на рис. 4 – 5.



1,2,3 – номера контрольных точек (рис.1)

Рис. 4. Изменение максимального давления пара внутри футеровки дна в процессе сушки



4,5,6 – номера контрольных точек (рис.1)

Рис. 5. Изменение максимального давления пара внутри футеровки задней стенки в процессе сушки

Из приведенных зависимостей видно, что наибольшее давление в футеровке в процессе сушки развивается в точке, расположенной под горелкой, и составляет 0,45 МПа. Поэтому в дальнейшем при выборе температурного режима сушки в качестве контрольной принимается точка 1.

## Исследование влияния числа горелочных устройств на равномерность сушки

При сушке промежуточного ковша важно обеспечить однородность температурного поля наливной футеровки, чтобы избежать чрезмерных усадочных и термических напряжений в бетоне. С этой целью регламентируется абсолютная или относительная величина максимального отклонения температуры на нагреваемой поверхности от ее среднего значения. Обычным является требование, чтобы неравномерность нагрева не превышала 10 %. Одним из способов обеспечения такого условия является увеличение числа горелочных устройств, устанавливаемых на крышке станда. Для оценки этого фактора с помощью математической модели выполнялись расчеты процесса сушки для случаев, когда число горелок изменялось в диапазоне от 3 до 10. Горелки размещались через одинаковые расстояния вдоль оси  $x'$  (рис. 1), расход природного газа составлял  $B_m = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ , коэффициент расхода воздуха принят равным  $n = 4$ .

Из полученных результатов следует, что во всех рассмотренных случаях на поверхности промковша имеет место неравномерное распределение температуры. Для наглядности на рис. 6 приведены распределения температуры на поверхности пода вдоль линии расположения горелок в различные моменты времени. На протяжении первых трех часов разность температур по линии горелок на поверхности увеличивается до  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , а общий перепад – до  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ . В процессе сушки температурное поле стремится несколько выровняться, однако общий перепад температур даже на 30-ом часе составляет  $73 \text{ }^\circ\text{C}$ .

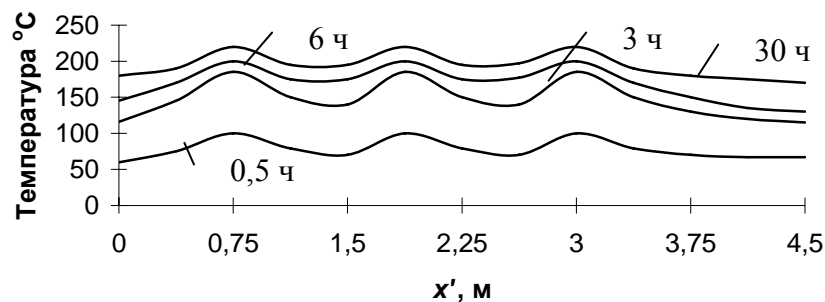


Рис. 6. Изменение температуры поверхности пода вдоль линии расположения горелок в различные моменты времени  
6<sup>н</sup> горелок,  $B_m = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $n = 4$

На рис. 7 приведена зависимость общего перепада температур по поверхности пода промковша от числа горелок. Из этого графика видно, что при увеличении количества горелок общий перепад температур снижается от  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  при трех горелках до  $36 \text{ }^\circ\text{C}$  при десяти. При

переходе от пяти к шести горелкам происходит резкое снижение неравномерности температурного поля для данного ковша. Во всех случаях наибольшие значения температур наблюдаются под горелочными устройствами, а наименьшие – между ними. При этом самые низкие значения температуры получаются в центральной части промковша в районе дымоотводящего канала.

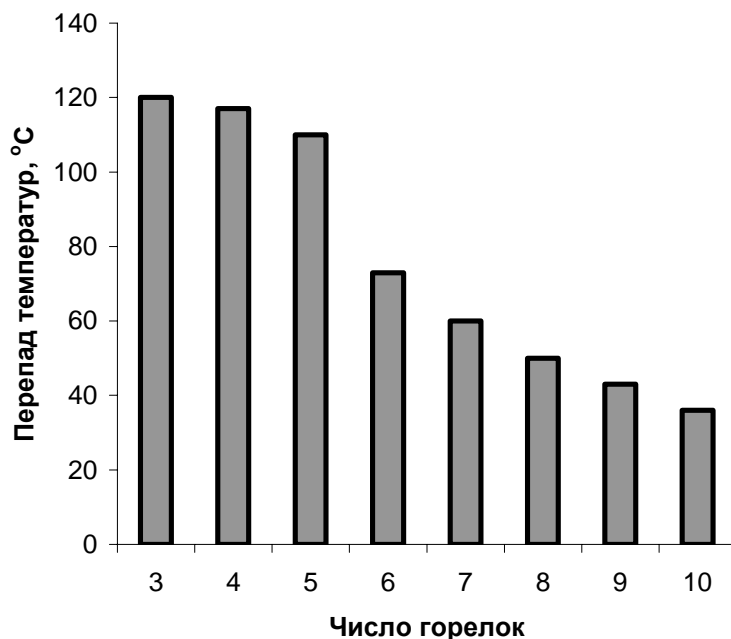


Рис. 7. Зависимость максимального перепада температур на поверхности пода промковша от числа установленных горелок

### Выводы

Применение смешанной формулировки задачи высокотемпературной сушки бетона позволило получить математическую модель тепловой обработки промежуточного ковша, пригодную для различных температурных и теплофизических условий. Из результатов моделирования следует, что для обеспечения равномерного конвективного разогрева промежуточного ковша необходимо выбирать количество и месторасположение горелок таким образом, чтобы весь под был покрыт температурными «пятнами» как можно плотнее. Это приводит к более качественной и безопасной сушке монолитной футеровки.

### Список литературы

1. Романько Я.В., Решетняк С.И. Исследование сушки наливной футеровки промежуточного ковша // *Металлургическая теплотехника*. – Днепропетровск: Новая идеология, 2008. – С. 246 – 254.
2. Zhen-Xiang Gong and Arun S. Mujumdar. Development of Drying Schedules for One-Side-Heating Drying of Refractory Concrete Slab Based on Finite Element Model // *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 79, № 6, 1996. – pp. 1649 –1658.
3. Z. P. Bazant and W. Thonguthai. Pore Pressure and Drying of Concrete at High Temperature. // *Proceedings ASCE*, Vol. 104, № EM5, 1979. – pp. 1059–1079.
4. Celia M.A. and Bouloutas E.T. A General Mass-Conservative Numerical Solution for the Unsaturated Flow Equation. // *Water Resources Research*, American Geophysical Union, Vol. 26, No 7, 1990. – pp. 1483 – 1496.
5. Goangseup Zi and Zdenek P. Bazant. Decontamination of Radionuclides from Concrete by Microwave Heating. II: Computations. // *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, July 2003. – pp. 785–792.
6. Richard K. K. Yuen, W. K. Kwok, S. M. Lo, and J. Liang. Heat and Mass Transfer in Concrete at Evaluated Temperature. // *Numerical Heat Transfer*, Taylor & Francis, Part A, 51, 2007. – pp. 469–494.
7. Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Минаев А.А. Процессы непрерывной разливки. – Донецк: ДНТУ, 2002.– 536 с.

*Рукопись поступила 30.06.2009 г.*