

УДК 621.746: 669.18

Романько Я.В. – ас., Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ)

Решетняк С.И. – к.т.н., доц. НМетАУ

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА СУШКИ СЕМИРУЧЬЕВОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША

Разработанная ранее комплексная математическая модель включает расчет внешнего теплообмена в рабочем пространстве сложной формы, а также перемещения и удаления влаги из бетонных стенок промежуточного ковша машины непрерывного литья заготовок. В настоящей работе эта модель была использована для изучения влияния формы промежуточного ковша на процесс его сушки. Для этого были выполнены сопоставительные расчеты сушки промежуточных ковшей двух различных типов. Полученные распределения температуры и давления в порах бетона для отдельных поверхностей показали влияние расположения горелочных устройств на равномерность и безопасность сушки монолитных стенок. Для принятых конструктивных параметров лучшие результаты были достигнуты для семиручьевого промежуточного ковша.

Ключевые слова: промежуточный ковш, монолитная футеровка, сушка, давление, математическая модель

Введение

Для получения металлургической продукции высокого качества применяют непрерывную разливку стали с помощью машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Одним из основных элементов МНЛЗ является промежуточный ковш (промковш), который выполняет ряд функций, наиболее важными из которых являются: распределение жидкой стали по ручьям, регулирование скорости истечения металла, усреднение стали по температуре и химическому составу, уменьшение неметаллических включений в литой заготовке, поддержание постоянной температуры жидкой стали [1].

В настоящее время для получения арматурного слоя футеровки промежуточных ковшей все чаще применяют безобжиговые литые бетоны из различных огнеупорных масс, которые приобретают необходимые свойства в результате сушки до 400 – 600 °С. Использование таких масс позволяет избежать больших энергозатрат на высокотемпературный обжиг, но требует длительной и осторожной сушки. Бы-

стрый подъем температуры приводит к тому, что испаряющаяся влага из-за малого размера пор в структуре бетона очень медленно перемещается к поверхности и в результате создает внутри него высокое давление, что может вызвать взрывное растрескивание материала [2]. Кроме того, неравномерный нагрев футеровки в процессе сушки способствует появлению усадочных микротрещин, которые ухудшают эксплуатационные свойства монолитного слоя. Для предотвращения таких явлений применяют многоступенчатые режимы сушки с ограниченной скоростью разогрева в каждом периоде, а также вводятся ограничения по равномерности температурного поля футеровки.

Для оценки влияния различных факторов на процесс сушки промежуточного ковша с монолитной футеровкой была разработана комплексная математическая модель [3], которая включает расчет внешнего теплообмена в рабочем пространстве сложной формы, теплопроводности футеровки, а также перемещения и удаления влаги из бетонных стенок. Эта модель была использована для исследования процесса сушки шестиручьевого промежуточного ковша [4]. В результате моделирования показано, что наиболее значительные градиенты температур и давлений возникают в участках футеровки, расположенных напротив горелочных устройств, а наименьшие – вблизи окна дымового канала.

Целью настоящей работы является изучение влияния типа промковша на процесс его сушки. Для этого с помощью математической модели выполняются сопоставительные расчеты сушки шестиручьевого и семиручьевого промежуточных ковшей при одинаковой тепловой нагрузке.

Основополагающие уравнения комплексной математической модели

Теплообмен в газе, заполняющем свободное пространство внутри камеры промковша, описывается уравнением энергии:

$$\frac{\partial(\rho UCT)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VCT)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho WCT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_V, \quad (1)$$

где T – температура газа; ρ и C – плотность и теплоемкость газа; U , V , W – осредненные составляющие вектора скорости в направлениях осей x , y , z ; $\lambda_{эф}$ – эффективная теплопроводность, учитывающая турбулентный перенос тепла в газе; q_V – объемная плотность радиационного теплового потока.

Осредненные составляющие вектора скорости находятся из уравнений движения и неразрывности для газа:

$$\frac{\partial(\rho U^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VU)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho WU)}{\partial z} = \text{div}(\mu_{эф} \text{grad } U) - \frac{\partial P}{\partial x}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho UV)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho WV)}{\partial z} = \operatorname{div}(\mu_{\text{eff}} \operatorname{grad} V) - \frac{\partial P}{\partial y}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho UW)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho VW)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W^2)}{\partial z} = \operatorname{div}(\mu_{\text{eff}} \operatorname{grad} W) - \frac{\partial P}{\partial z}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

где P – давление; μ_{eff} – эффективная вязкость, равная сумме вязкости газа μ и турбулентной вязкости μ_T .

Для нахождения турбулентной вязкости μ_T используется *RNG k-ε* модель турбулентности. Согласно этой модели

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

где C_μ – постоянная модели, k – кинетическая энергия турбулентности; ε – скорость диссипации кинетической энергии.

Значения k и ε определяются из уравнений:

$$\frac{\partial(\rho Uk)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho Vk)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho Wk)}{\partial z} = \operatorname{div}\left(\frac{\mu_{\text{эф}}}{\sigma_k} \operatorname{grad} k\right) + \mu_T G_T - \rho \varepsilon; \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho U\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V\varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W\varepsilon)}{\partial z} = \operatorname{div}\left(\frac{\mu_{\text{эф}}}{\sigma_\varepsilon} \operatorname{grad} \varepsilon\right) + \frac{C_1 \mu_T G_T \varepsilon}{k} - \frac{C_2 \rho \varepsilon^2}{k} + R, \quad (8)$$

где $C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, R$ – параметры модели турбулентности.

Для нахождения объемной плотности радиационного потока q_r , входящего в уравнение энергии (1), необходимо найти распределение интенсивности излучения в объеме газа. С этой целью решается уравнение радиационного переноса, которое при использовании модели взвешенной суммы серых газов имеет следующий вид:

$$\frac{dI_n}{ds} = k_n (I_b - a_n I_n), \quad (9)$$

где I_n – интенсивность излучения n -го серого газа, $n = 0, 1, 2 \dots N_s$; N_s – число серых газов I_b – интенсивность излучения черного тела при температуре газа T ; s – направление переноса излучения; a_n и k_n – коэффициенты модели взвешенной суммы серых газов.

Распределение объемной плотности лучистого теплового потока в газе находится как

$$q_V = \sum_{n=1}^{N_s} k_n (4a_n \sigma_0 T^4 - \int_{4\pi} I_n d\Omega). \quad (10)$$

Уравнения процессов переноса тепла и влаги по толщине стенки имеют вид:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial S} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial S} \right) + C_a \frac{\partial W}{\partial \tau} - C_w \frac{a}{g} \frac{\partial P}{\partial S} \frac{\partial T}{\partial S}; \quad (11)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{a}{g} \frac{\partial P}{\partial S} \right) + \hat{W}_d \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (12)$$

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 – температура; τ – время; S – координата, направленная по нормали к стенке; ρ , C и λ – плотность, теплоемкость и теплопроводность бетона; C_a – тепло испарения свободной воды; C_w – теплоемкость воды.

Приведенные выше уравнения дополняются граничными и начальными условиями с учетом конструктивных параметров рассматриваемого промковша и теплового режима его разогрева. Решение рассмотренных выше уравнений выполняется на основе метода контрольного объема [5]. Более комплексная математическая модель рассмотрена в [3, 4].

Применение модели для расчета промковшей двух типов

Схемы (в плане) шестиручьевого и семиручьевого промежуточных ковшей приведены на рис. 1. Как видно из рисунка, семиручьевой промковш является несколько более узким и имеет выступ в центральной части. Для моделирования были приняты следующие его основные размеры: $L = 7,7$ м, $L_1 = 0,62$ м, $L_2 = 0,84$ м, $b = 1,8$ м, $b_1 = 0,98$ м. Глубина промежуточного ковша составляет $h = 1,2$ м.

При моделировании шестиручьевого промковша были приняты следующие его размеры: $L = 9,5$ м, $L_1 = 1$ м, $b = 1,75$ м, $b_1 = 0,75$ м. Глубина его составляет $h = 1,25$ м.

В обоих случаях арматурный слой и его крышка имеют толщину 150 мм и изготавливаются из алюмосиликатной массы, содержащей $Al_2O_3 > 70\%$, $SiO_2 < 25\%$, $Fe_2O_3 < 3\%$. Относительная проницаемость бетона составляет $a = 10^{-12}$ м/с.

Горелки располагаются на крышке с постоянным шагом Δ на одной линии на левой половине промковша и симметрично – на правой его половине. Схема расположения шести горелок на крышке показана на рис. 1. Отвод продуктов сгорания осуществляется через один дымовой канал, расположенный на оси симметрии крышки.

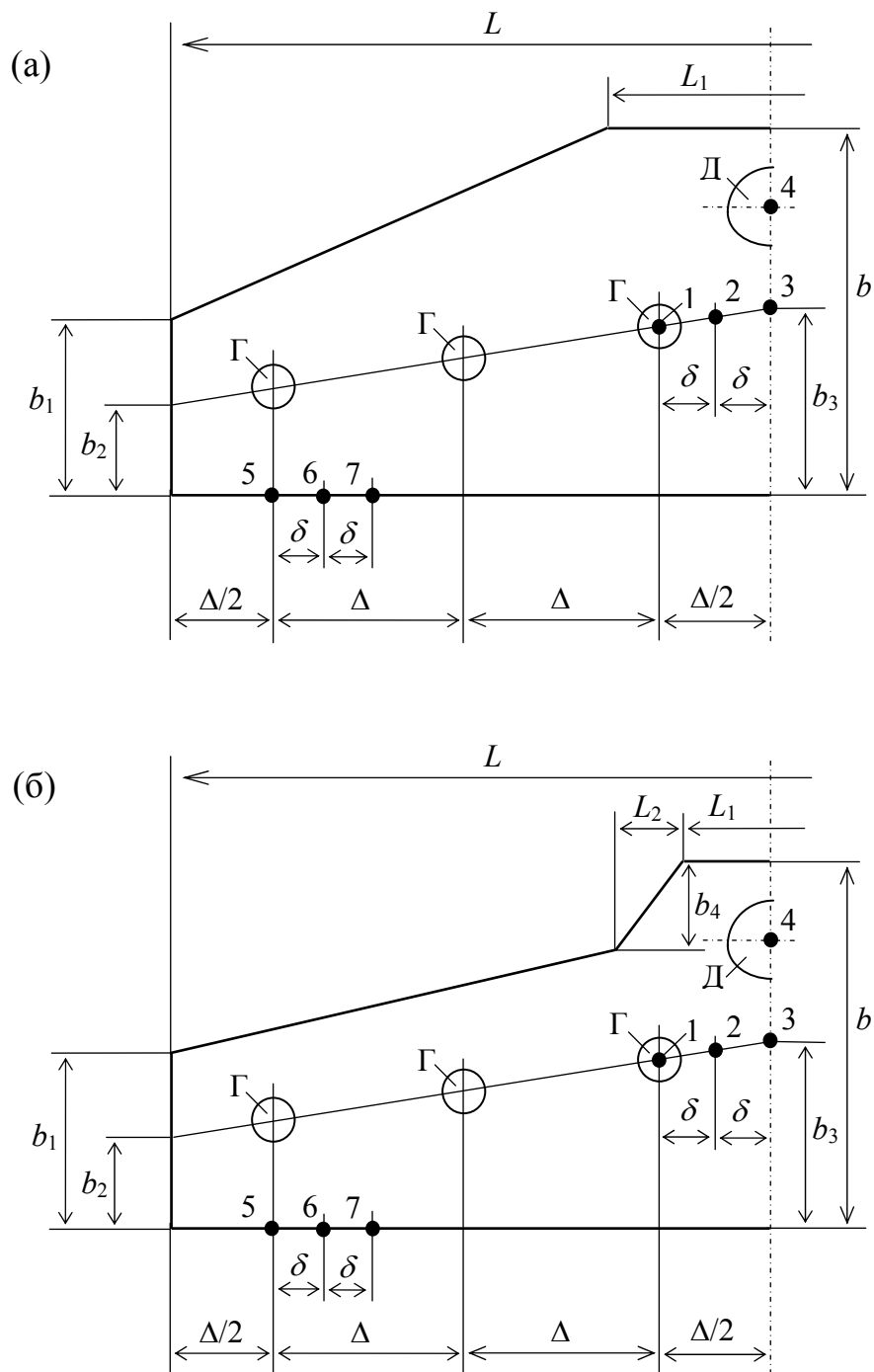


Рис. 1. Схемы (план) шестиручьевого (а) и семиручьевого (б) промковшей.
 Обозначения: Г – горелки; Д – дымоотбор; 1,2,...,7 – точки контроля давления

Для сопоставительных расчетов процесса сушки промковшей двух типов расход топлива принимался постоянным и составлял $V_2 = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$, а коэффициент расхода воздуха был принят равным $4 \text{ м}^3/\text{м}^3$. В качестве топлива использовался природный газ с теплотой сгорания $35 \text{ МДж}/\text{м}^3$. На рис. 2 показано распределение температур на поверхностях днища (а) и задней стенки (б) семиручьевого промежу-

точного ковша после 30 часов сушки. Из них видно, что наибольшие значения температуры имеют место непосредственно под горелками на днище промковша, а наименьшие – на периферии стен. При этом на задней стенке нет явно выраженных «горячих пятен» от факелов горелок.

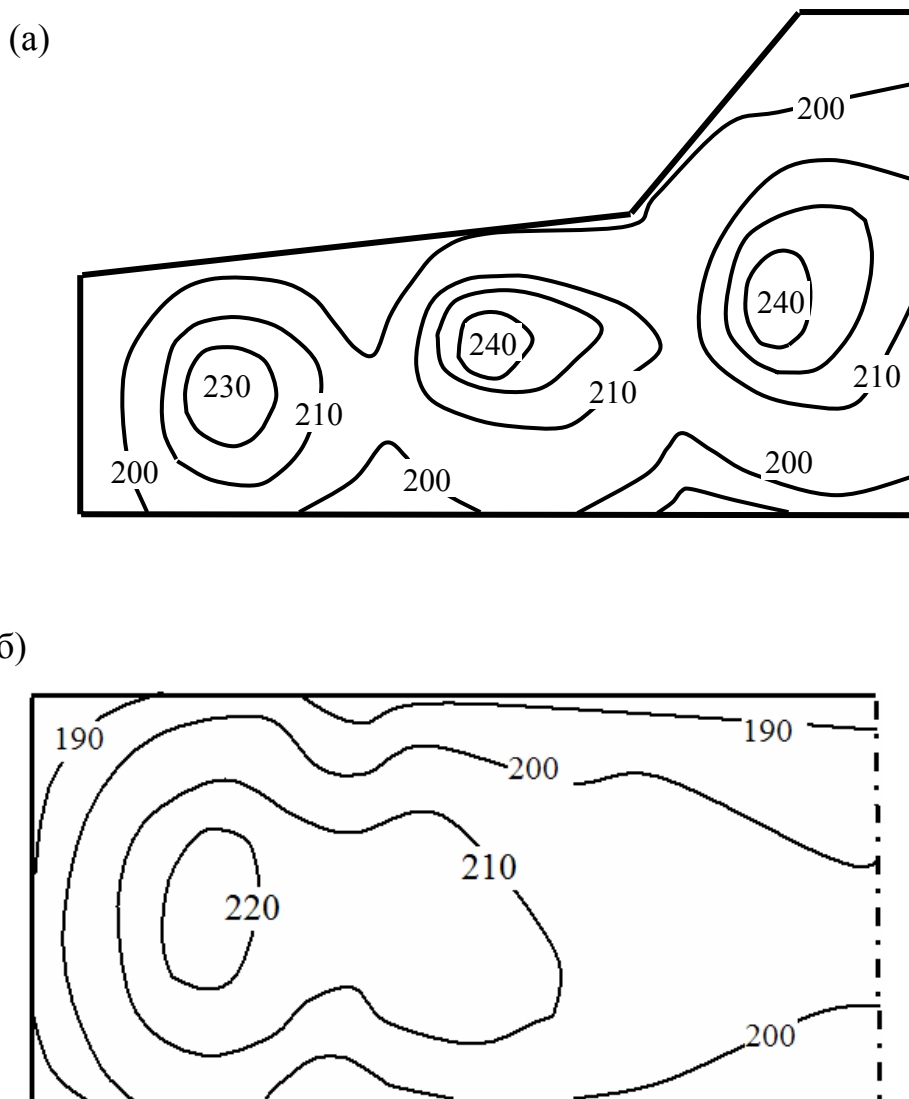


Рис. 2. Распределение температур на поверхностях днища (а) и задней стенки (б) семиручьевого промежуточного ковша после 30 часов сушки

На рис. 3 показано распределение температур на поверхности днища шестиручьевого промежуточного ковша после 30 часов сушки. Температурное поле на поверхности его задней стенки очень сходно с аналогичным полем, приведенным на рис. 2(б), и поэтому не показано.

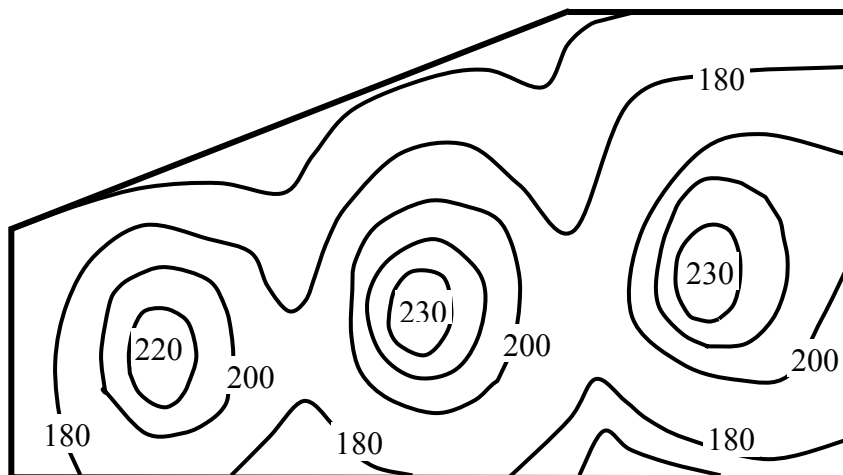


Рис. 3. Распределение температур на поверхности дна шестиручьевого промежуточного ковша после 30 часов сушки

Из сопоставления полученных полей температур следует, что качественная картина равномерности нагрева очень сходна: наибольшие значения температур наблюдаются под горелочными устройствами, образуя «горячие пятна» на нагреваемых поверхностях футеровки, а наименее нагретые области находятся на периферии, вблизи боковых стен. При этом абсолютные значения температур у шестиручьевого ковша ниже, что вызвано большим его поперечным сечением и, соответственно, массой стен и крышки. Также видно, что на поверхности дна шестиручьевого промковша вблизи скоса фронтальной стенки имеется область с пониженной температурой. Максимальная неравномерность нагрева поверхности составляет более $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Изменение расчетного максимального давления пара внутри футеровки в процессе сушки приведено на рис. 4 (дно) и рис. 5 (задняя стенка). Расположение контрольных точек показано на рис. 1. Давление в участках футеровки, обозначенных точками 5, 6 и 7, для обоих рассматриваемых промковшей отличается друг от друга незначительно и поэтому на рис. 5 приведены зависимости только для семиручьевого промежуточного ковша.

Характер изменения давления пара в порах бетона в различных контрольных точках качественно одинаков, т.е. происходит постепенное его возрастание до максимального, а затем резкое падение до минимального значения. Наибольшее давление $0,43\text{ МПа}$ достигается в точке 1, расположенной под горелкой, примерно через 11 часов сушки. Для задней стенки максимальное давление пара достигается на 2 часа раньше, но при этом его значение ниже и составляет примерно

0,28 МПа. Из рассматриваемых контрольных точек наименьшее давление возникает в точке 6, расположенной на задней стенке. Из полученных значений ни одно из давлений не достигает опасного значения, при котором возможно возникновение взрывного растрескивания бетона [2].

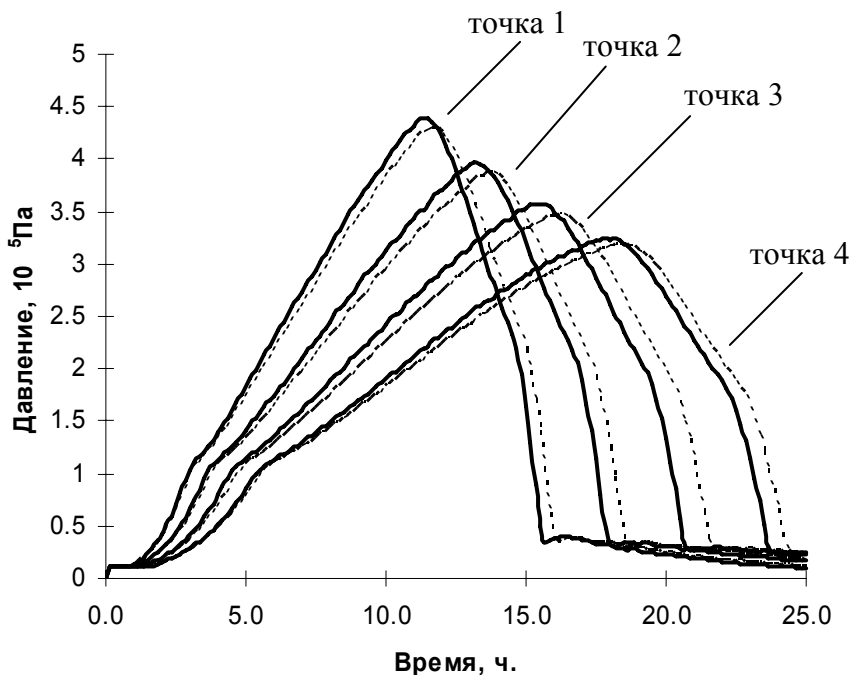


Рис. 4. Изменение максимального давления пара внутри футеровки дна в процессе сушки семиручьевого (сплошные линии) и шестиручьевого (пунктирные линии) промежуточных ковшей

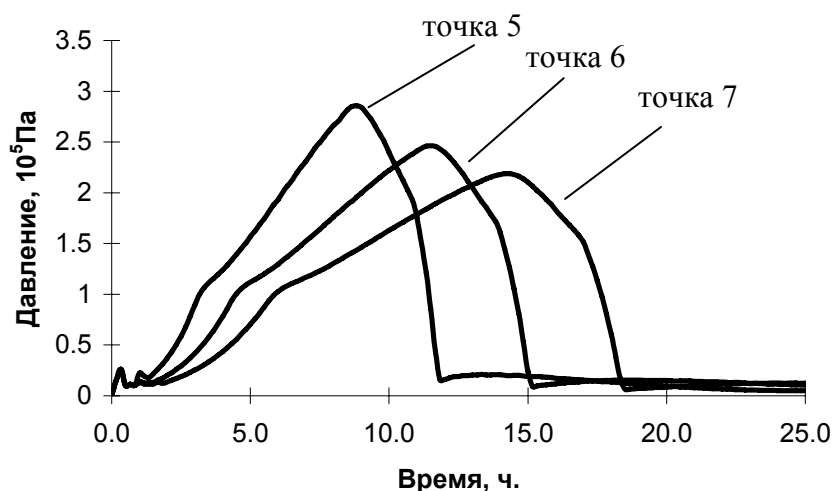


Рис. 5. Изменение максимального давления пара внутри футеровки задней стенки семиручьевого промковша в процессе сушки

Из сравнения результатов моделирования шестиручьевого и семиручьевого промежуточных ковшей следует, что качественная картина равномерности нагрева очень сходна: наибольшие значения температур наблюдаются под горелочными устройствами, образуя «горячие пятна» на нагреваемых поверхностях футеровки. Тем не менее, для принятых конструктивных параметров лучшие результаты по равномерности и безопасности разогрева и сушки достигаются в семиручьевом промковше. Основной причиной этого является, по-видимому, большая ширина шестиручьевого промковша в средней части и, соответственно, большая масса его стен и крышки. Возможным путем устранения этого недостатка является установка дополнительных горелок таким образом, чтобы «горячие пятна» на днище более равномерно распределились по всей нагреваемой поверхности.

Выводы

С помощью комплексной математической модели было изучено влияние типа промежуточного ковша на процесс его сушки. В результате установлено, что хотя моделируемый семиручьевой промежуточный ковш отличается по форме и размерам от шестиручьевого промковша, в целом характер распределения температуры и давления в стенках в процессе сушки сохраняется. Тем не менее, для принятых конструктивных параметров лучшие результаты по равномерности и безопасности разогрева и сушки достигаются в семиручьевом промковше. Основной причиной этого является, по-видимому, большая ширина шестиручьевого промковша в средней части и, соответственно, большая масса его стен и крышки. Возможным путем устранения этого недостатка является установка дополнительных горелок таким образом, чтобы «горячие пятна» на днище более равномерно распределились по всей нагреваемой поверхности.

Список литературы

1. Смирнов А. Н. / Процессы непрерывной разливки // А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев. – Донецк : ДНТУ, 2002. – 536 с.
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. – 1996. – Vol. 79, № 6. – P. 1649–1658.
3. Романько Я. В. Исследование сушки наливной футеровки промежуточного ковша / Я. В. Романько, С. И. Решетняк // Металлургическая теплотехника. – Днепропетровск : Новая идеология, 2008. – С. 246–254.

4. Романько Я. В. Моделирование сушки промежуточного ковша с монолитной футеровкой / Я. В. Романько, С. И. Решетняк // Металлургическая теплотехника. – 2009. – Вып. 1 (16). – Днепропетровск: Новая идеология, 2009. – С. 166–173.

5. Versteeg Н. К., Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method. – London : Logman Scientific & Technical, 1995. – 257 p.

Рукопись поступила 10.07.2009 г.