

СВЯЗЬ ПЛОТНОСТЕЙ ПОТОКОВ С ДЛИНОЙ ФАКЕЛА В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ ВАННОЙ ПЕЧИ

© П.А. Силкин, В.Г. Свиткин, Е.В. Выволокина, Т.О. Девярых, 2012

*ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург*

Для оценки связи длины факела с плотностями потоков нами была построена трехмерная математическая модель внешней задачи в печи с жидкой ванной. В математической модели для решения был использован зональный метод. В задачах зонального метода отдельные потоки имеют разный физический смысл, поэтому их связь с таким параметром факела, как его длина, имеет свои особенности. В балансовом плане наибольшую связь с теплотребованиями (в том числе и с расходом топлива) имеют результирующие потоки. И здесь проявляется прежде всего различие типа зон, их теплообменного характера. Зоны поверхности расплава являются зонами II рода, для которых заданы теплотребования в виде значений удельных результирующих потоков (также учитываются потери теплоты через стенки и дно бассейна); по этой причине от длины факела могут зависеть лишь локальные характеристики теплообмена – в среднем ситуация не должна зависеть от длины факела. В табл. 1, приведены данные, которые подтверждают это положение.

Таблица 1

Параметры результирующих потоков на поверхности стекломассы

Длина факела, м	q_{max} , кВт	x_{max} , м	y_{max} , м	$q_{ср}$, кВт	σ_q , кВт
3,178	1906,513	6,339	1,773	546,624	441,634
6,300	1913,720	6,350	1,722	548,651	442,946
9,534	1917,190	6,347	1,723	548,945	443,322
11,580	1918,799	6,349	1,723	548,945	443,322
13,620	1916,399	6,349	1,727	547,699	442,840

Цифры в последнем столбце таблицы характеризуют разброс величин результирующих потоков (их среднеквадратичное отклонение). Он определяется по формуле:

$$\sigma_q = \sqrt{\frac{1}{L \cdot B} \int_0^L \int_0^B [q(x, y) - q_{ср}]^2 dx dy},$$

где L и B – длина и ширина печи, м.

На рис. 1 показана типичная картина распределения потоков по поверхности расплава (на всех рисунках цифры на кривых – величина потока, кВт).

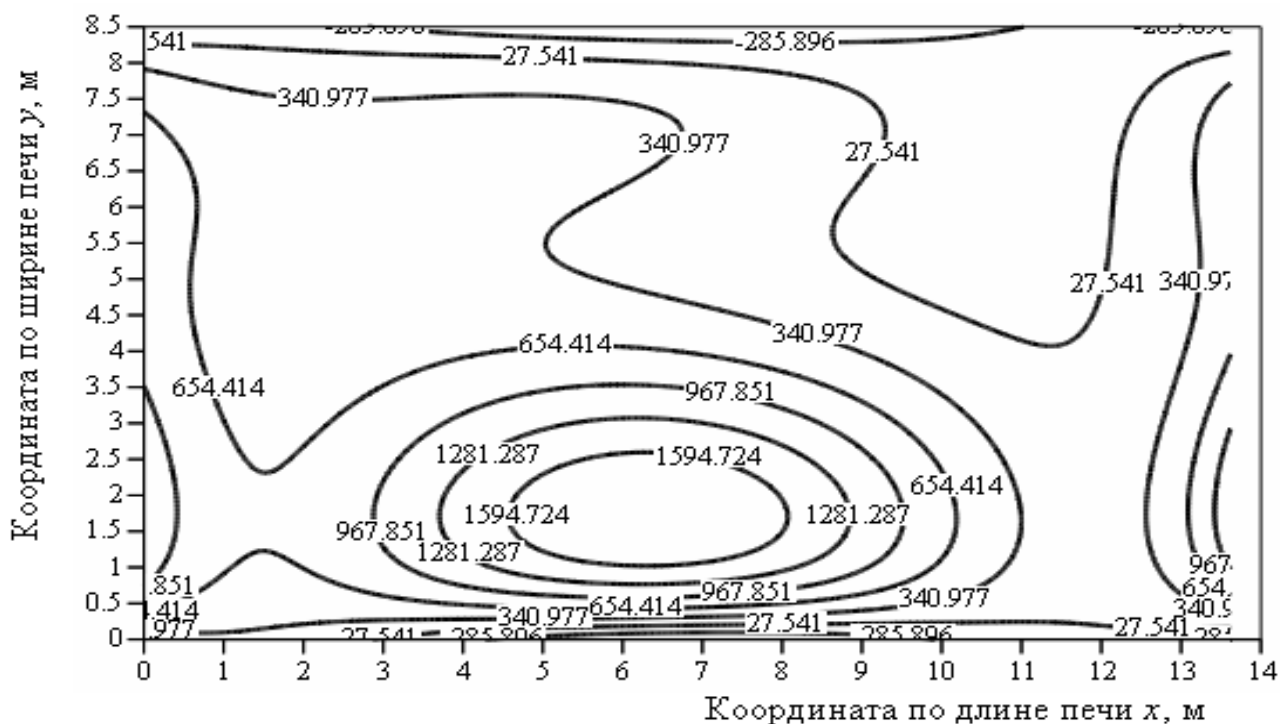


Рис. 1. Результирующие потоки на поверхности ванны

Зоны свода печи относятся к зонам третьего рода, для которых задаются связи температуры зоны с плотностью результирующего потока. Так как при изменении длины факела распределение тепловыделений также изменяется, то картина результирующих потоков будет зависеть от длины факела. Поскольку результирующие потоки в соответствии с названием отражают суммарный итог лучисто-конвективного теплообмена, то эти зависимости будут не слишком сильными, но все же заметными.

В табл. 2 показаны параметры распределения результирующих потоков по поверхности свода.

Таблица 2

Параметры результирующих потоков на поверхности свода

Длина факела, м	q_{max} , кВт	x_{max} , м	y_{max} , м	$q_{ср}$, кВт	σ_q , кВт
3,178	13,266	6,087	6,758	6,936	3,277
6,300	13,624	6,563	6,529	7,613	2,997
9,534	12,998	6,985	6,236	7,997	2,827
11,58	13,466	7,202	6,268	8,395	3,020
13,62	14,089	7,113	6,313	8,412	3,093

Из данных таблицы можно видеть, что в общем случае при увеличении длины факела условия службы огнеупоров свода ухудшаются, так как значения потоков возрастают не только в точке максимума, но и в среднем.

Картина распределения результирующих потоков на своде вполне типична, и при разных длинах факела отличается лишь в деталях. На рис. 2 в качестве примера показано распределение для базовой длины факела (9,534 м).

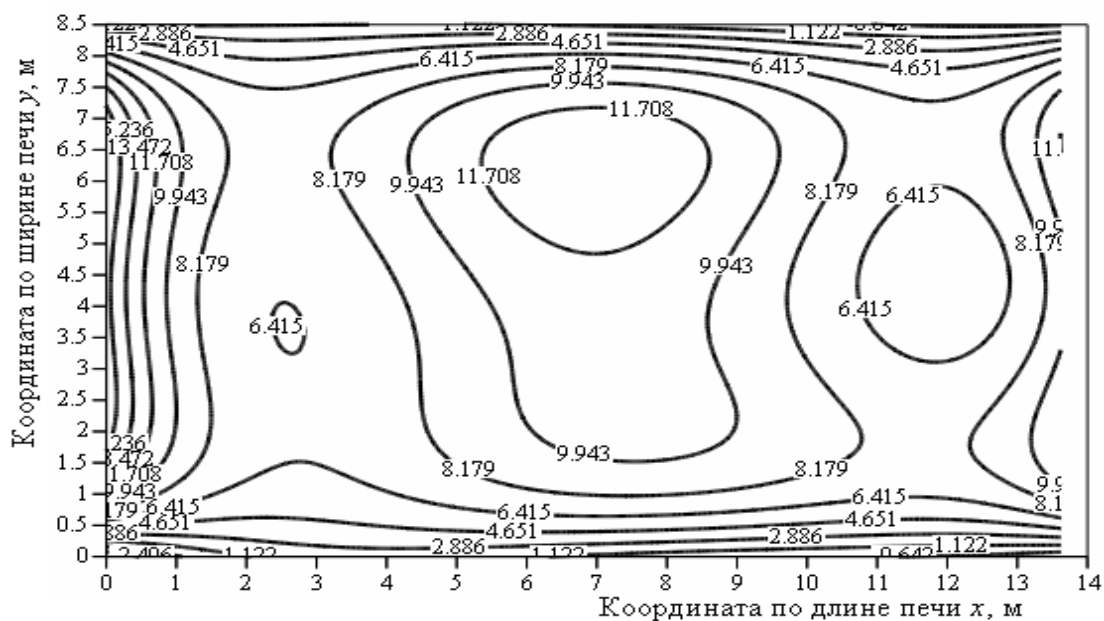


Рис. 2. Распределение результирующих тепловых потоков по поверхности свода при базовой длине факела

В отличие от результирующих потоков, которые в неявной форме учитывают теплопотребления, падающие тепловые потоки в балансовом плане являются «полуфабрикатом», так как характеризуют приход теплоты без отслеживания ее дальнейшего расходования. В этом случае различие поверхности стекломассы и поверхности свода как приемников излучения проявляется лишь через радиационные характеристики и расстояния до объемов тепловыделения (до факела). Так как геометрически факел ближе к поверхности ванны, то по величине падающие на нее потоки будут несколько выше, что хорошо видно из сопоставления данных табл. 3 и табл. 4.

Таблица 3

Параметры падающих потоков на поверхности стекломассы

Длина факела, м	q_{\max} , кВт	x_{\max} , м	y_{\max} , м	$q_{\text{сред}}$, кВт	σ_q , кВт
3,178	5622,650	0,000	1,932	1817,145	1267,785
6,300	4976,533	5,655	1,792	2119,416	1221,137
9,534	5205,960	6,854	1,780	2191,285	1197,814
11,580	4975,711	7,123	1,856	2231,086	1199,315
13,620	4485,394	7,098	6,764	2125,690	1165,064

Можно видеть, что в обоих случаях из примерно одинаковых закономерностей выпадает самый короткий факел (3,178 м).

Таблица 4

Параметры падающих потоков на поверхности свода

Длина факела, м	q_{\max} , кВт	x_{\max} , м	y_{\max} , м	$q_{\text{сред}}$, кВт	σ_q , кВт
3,178	6045,190	0,000	1,860	1774,035	1126,632
6,300	4316,125	5,335	1,786	2112,410	965,099
9,534	4424,280	6,818	1,777	2228,115	937,690
11,580	4250,628	7,169	1,842	2288,739	971,194
13,620	4035,914	7,263	6,710	2179,024	962,680

Отметим, что распределение падающих потоков по поверхности стекломассы при данной длине факела точно такое же, имеется лишь количественное отличие потоков, что, собственно, уже видно из данных табл. 3 и табл. 4.

При других длинах факела устанавливается в качественном плане однотипное распределение падающих потоков как по поверхности стекломассы, так и по поверхности свода.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ВАННЕ ПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

© П.А. Силкин, В.Г. Свиткин, Д.В. Кадникова, 2012

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург

При разработке численной схемы плавильной печи целесообразно тщательно учесть особенности расплава. Первой такой особенностью является его большая плотность. Учитывая также большую вязкость и медленное движение (практически ползущее), можно уверенно считать расплав несжимаемой жидкостью. Конечно, его плотность зависит от температуры, а температура в ванне изменяется, но, во-первых, эта зависимость слабая и, во-вторых, температура расплава в ванне изменяется от 1000 °С до 1580 °С (максимум), что приводит к относительно малым изменениям плотности. Иными словами, с достаточной точностью можно считать для расплава $\operatorname{div} \mathbf{v} = 0$ и записать уравнения движения в виде:

• в проекции на ось x

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right]; \quad (1)$$

• в проекции на ось y

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right]; \quad (2)$$

• в проекции на ось z

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \rho g; \quad (3)$$

Вязкость расплава существенно зависит от температуры. Однако уравнения (1)–(3) – это уравнения баланса импульса для бесконечно малого объема. При составлении этого баланса можно считать, что температура расплава, а следовательно, и его вязкость, в пределах элементарного объема одинакова. Тогда μ можно вынести из-под знака производных, что приводит к упрощению уравнений.

В самом деле, например, в уравнении (1) можно при этом выделить слагаемые

$$\mu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial z \partial x} = \mu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0,$$