

*О.Г. Дорохина., А.А. Карвецкий, В.А. Арутюнов,
В.В. Курносов, И.А. Левицкий*

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ПЕЧИ ВЫСОКОТОЧНОГО НАГРЕВА¹

При термической обработке в печи высокоточного нагрева особое значение имеет однородность температурного поля заготовок, во многом определяющая однородность полей их физических свойств после термической обработки. Однородность температурного поля обусловлена однородностью распределения плотности теплового потока по поверхности заготовок, которая, в свою очередь, зависит от характеристик горелочных устройств, их положения в рабочем пространстве печи, режима их работы.

В данной работе методом математического моделирования изучено влияние параметров горелочного устройства, установленного в нижней части печи высокоточного нагрева, на равномерность нагрева в ней цилиндрических заготовок. Основные допущения разработанной математической модели следующие:

- рассматриваемая задача считается двумерной (т.е. условия вдоль заготовки считаются однородными);
- кинетика горения газообразного топлива не рассматривается (предполагается, что из горелочного устройства выходит поток продуктов сгорания заданного состава и температуры, что соответствует использованию рекуперативной горелки полного предварительного смешения);
- характер движения продуктов сгорания (ПС) считается турбулентным, для моделирования турбулентности применима стандартная k - ϵ модель;
- стенки камеры печи в гидравлическом отношении являются шероховатыми (коэффициент трения на стенке зависит только от заданной высоты выступов шероховатости), в тепловом отношении – адиабатными (это допущение не вносит существенной погрешности, введено для упрощения модели, поскольку вопросы теплового баланса в исследовании не рассматриваются);
- радиационный теплообмен в рабочем пространстве печи не учитывается (рассматривается только конвективный и кондуктивный перенос в объеме продуктов сгорания с учетом турбулентности, конвективная теплоотдача к поверхности заготовки и задача теплопроводности внутри заготовки).

Схема рабочего пространства печи, соответствующая выбранной двумерной постановке задачи, показана на рис. 1.

В соответствии со сделанными допущениями, рассматриваемая задача описывается двумя уравнениями Навье–Стокса и уравнением неразрывности (дополненными еще двумя уравнениями переноса субстанции для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ϵ), а также уравнением энергии (в области заготовки вырождающимся в уравнение теплопроводности).

Программная реализация математической модели осуществлялась с помощью программного комплекса FLUENT, для генерации расчетной сетки применялся программный модуль GAMBIT.

Моделирование проводили для трех вариантов входных параметров ПС, условно соответствующих различным типам горелочных устройств: скорость ПС на входе 120 м/с и температура 1500 °С, высота входной щели 7,85 мм (I); скорость ПС на входе 82,6 м/с и температура 1000 °С, высота щели 11,86 мм (II); скорость ПС на входе 61,5 м/с и температура 700 °С, высота щели 16,33 мм (III). Основные исходные данные и сводные результаты математического моделирования для пробного периода нагрева продолжительностью 10 мин представлены в таблице. Выбранные для сравнения

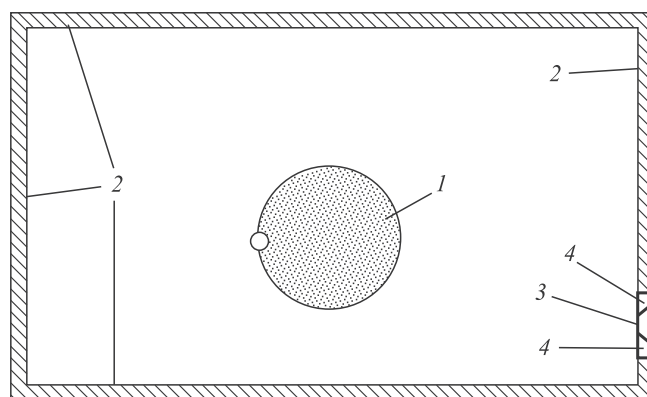


Рис. 1. Схема расположения заготовки и горелки в печи высокоточного нагрева:

1 – заготовка; 2 – внутренние поверхности стенок печи; 3 – входное сечение горелки; 4 – выходное сечение горелки

¹ Работа выполнена в рамках гранта по Постановлению правительства РФ № 218 от 09.04.2010.

Сопоставление результатов, полученных для трех вариантов расчета

Показатель	Вариант расчета		
	I	II	III
Начальная температура ПС, °С	1500	1000	700
Высота входной щели, мм	7,85	11,86	16,33
Средняя скорость ПС на входе, м/с	120,0	82,6	61,5
Массовый расход ПС на входе, кг/с	0,1876	0,2662	0,3646
Объемный расход ПС на входе, м³/с	0,94	0,97	1,00
Поток энтальпии на входе, кВт	400,4991	400,4991	400,4991
Поток импульса на входе, н	22,45	22,45	22,45
Плотность теплового потока на заготовку в начале нагрева, Вт/м²:			
максимальная	14 099,5	7124,6	1769,1
средняя	8850,6	4505,6	1120,4
минимальная	3392,1	1833,8	460,5
Плотность теплового потока на заготовку через 10 мин, Вт/м²:			
максимальная	13 907,7	7912,3	1738,8
средняя	8887,3	4505,5	1114,8
минимальная	3567,0	1934,5	482,9
Среднемассовая температура заготовки, °С:			
начальная	600,0	600,0	600,0
через 10 мин	604,0	602,0	600,5
Температура поверхности заготовки через 10 мин нагрева, °С:			
максимальная	631,2	615,7	603,9
средняя	619,3	610,1	602,5
минимальная	608,3	604,5	601,1
Кратность циркуляции (массовая)	9,35	8,20	5,98

варианты характеризовались одинаковыми значениями входных потоков импульса и энтальпии (именно для равенства обеих этих величин во всех рассматриваемых вариантах потребовалось различие в высоте входных сечений горелочных устройств); массовые и объемные расходы во входном сечении горелки при этом оказывались существенно различными.

В варианте I, соответствующем скоростной горелке, достигается максимальная величина кратности циркуляции (вычисляемой как отношение массового расхода через вертикальную поверхность над заготовкой ко входному потоку массы), равная 9,35; в варианте III, соответствующем низкотемпературной и низкоскоростной горелке, величина кратности циркуляции минимальна и равна 5,98; для варианта II, соответствующего промежуточным характеристикам, кратность циркуляции имеет промежуточное значение 8,2.

Безусловно, увеличение кратности циркуляции означает более эффективную схему движения дымовых газов и лучшее использование их теплоты до выхода из рабочего пространства, так как при этом увеличивается не только интенсивность взаимодействия потока ПС с

поверхностью заготовки, но и время их контакта.

Тем не менее, это увеличение кратности циркуляции не компенсирует неоднородность температуры в рабочем пространстве печи, изменяющейся от значения на поверхности заготовки до входной температуры потока в горелочном устройстве.

Распределение плотности теплового потока по поверхности заготовки в зависимости от угловой координаты в начале нагрева приведено на рис. 2, практически таким же оно остается через 10 мин после начала нагрева (точные количественные значения минимальной, максимальной и средней по поверхности заготовки величины плотности теплового потока в начале и конце пробного периода представлены в таблице). Угловая координата на рис. 2 отсчитывается по часовой стрелке от точки заготовки, наиболее удаленной от стенки печи с установленным горелочным устройством (эта точка помечена на рис. 1). Как видно из приведенных данных, распределение плотности теплового потока по поверхности заготовки носит немонотонный характер: кривая зависимости имеет два максимума и два минимума. Глобальный максимум на кривой соответствует

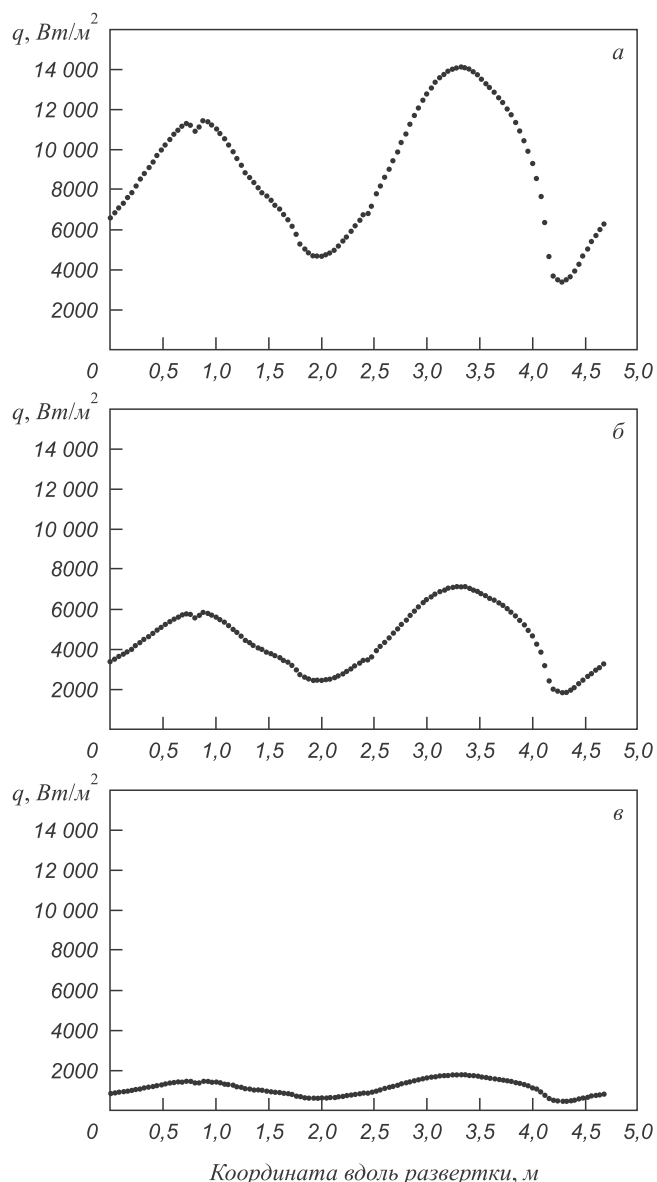


Рис. 2. Начальное распределение плотности теплового потока по поверхности заготовки:

$a - v_{\text{BX}} = 120 \text{ м/с}, T_{\text{BX}} = 1500 \text{ °C}, h_{\text{BX}} = 7,85 \text{ мм};$
 $\bar{b} - v_{\text{BX}} = 82,6 \text{ м/с}, T_{\text{BX}} = 1000 \text{ °C}, h_{\text{BX}} = 11,86 \text{ мм};$
 $\bar{в} - v_{\text{BX}} = 61,5 \text{ м/с}, T_{\text{BX}} = 700 \text{ °C}, h_{\text{BX}} = 16,33 \text{ мм}$

нижней части заготовки, атакуемой потоком продуктов сгорания, глобальный минимум – точке на поверхности заготовки, расположенный между нижней точкой и началом отсчета.

С уменьшением температуры и скорости ПС, выходящих из горелки, средний уровень теплового потока на заготовку снижается, а его неоднородность по поверхности заготовки сглаживается. Это, в свою очередь, приводит к соответствующему распределению температуры по поверхности заготовки, представленному на рис. 3 (точные количественные значения минимальной, максимальной и средней по поверхности заготовки температуры в конце пробного периода представлены в таблице). Перепад температуры по поверхности за-

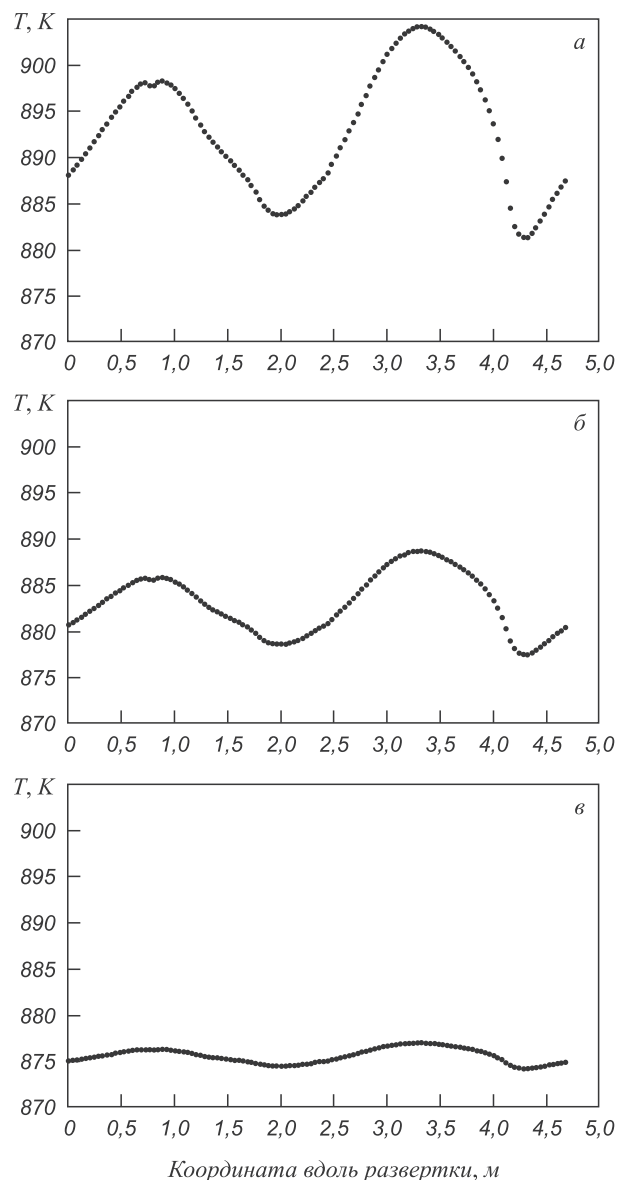


Рис. 3. Распределение температуры по поверхности заготовки через 10 мин после начала нагрева:

$a - v_{\text{BX}} = 120 \text{ м/с}, T_{\text{BX}} = 1500 \text{ °C}, h_{\text{BX}} = 7,85 \text{ мм};$
 $\bar{b} - v_{\text{BX}} = 82,6 \text{ м/с}, T_{\text{BX}} = 1000 \text{ °C}, h_{\text{BX}} = 11,86 \text{ мм};$
 $\bar{в} - v_{\text{BX}} = 61,5 \text{ м/с}, T_{\text{BX}} = 700 \text{ °C}, h_{\text{BX}} = 16,33 \text{ мм}$

готовки в конце пробного периода в варианте I превышает 20 °C, в варианте II около 10 °C, а в варианте III не превышает 3 °C. При этом среднемассовое значение температуры заготовки в конце пробного периода для варианта III всего на 3,5 °C ниже, чем в варианте I.

Полученные результаты позволяют вариант III схемы подачи ПС (низкоскоростная и низкотемпературная горелка) считать наиболее соответствующим целям высокоточного нагрева и рекомендовать именно такую схему на термических печах для обработки ответственных изделий.

© 2012 г. О.Г. Дорохина., А.А. Карвецкий, В.А. Арутюнов,
 В.В. Курносов, И.А. Левицкий
 Поступила 22 декабря 2011 г.