



УДК 621.745

Поступила 17.08.2016

## ДВИЖЕНИЕ ГАЗОВ В РОТАЦИОННЫХ НАКЛОНЯЮЩИХСЯ ПЕЧАХ GAS MOVEMENT IN ROTARY TILTING FURNACES

С. Л. РОВИН, УП «Технолит», г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: technolit@tut.by,  
Л. Е. РОВИН, В. А. ЖАРАНОВ, Гомельский государственный технический университет  
им. П. О. Сухого, г. Гомель, Беларусь, пр. Октября, 48. E-mail: kaf\_metallurgy@gstu.by

S. L. ROVIN, Technolit Co, Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: technolit@tut.by,  
L. E. ROVIN, V. A. ZHARANOV, Gomel State Technical University names after P. O. Sukhoj, Gomel,  
Belarus, 48, Ocyabrya ave. E-mail: kaf\_metallurgy@gstu.by

*Представлены результаты исследований движения газов и процессов теплообмена в ротационных наклоняющихся печах (РНП) при термообработке дисперсных материалов. Исследования выполняли с помощью численного моделирования с использованием прикладных программных пакетов ANSYS CFX и Solid Works Flow Simulation. Полученные результаты были использованы при разработке РНП различной мощности и назначения и позволили повысить их технико-экономические характеристики.*

*The article presents the results of studies of gas movement and heat and mass transfer processes in the rotary tilting furnace (RTF) at the heat treatment of disperse materials. The study was performed through computer modeling using software packages ANSYS CFX and Solid Works Flow Simulation. The results were used to design RTF with different capacity and application and helped to improve their technical and economic characteristics.*

**Ключевые слова.** Ротационные наклоняющиеся печи (РНП), движение газовых потоков, численное моделирование, тепло-массообмен, дисперсные материалы.

**Keywords.** Rotary tilting furnace (RTF), the movement of gas flows, numerical simulation, heat and mass transfer, dispersed materials.

### Введение

Ротационные наклоняющиеся плавильные печи (РНП) обеспечивают наиболее эффективную тепловую обработку дисперсных материалов. Термический КПД этих печей на операциях нагрева таких материалов, как чугунная и стальная дробленая стружка, мелкий скрап, окалина и другие подобные материалы с размерами частиц от 0,05–0,1 до 30–50 мм, достигает 50–60%, что в 2,5–5,0 раз выше КПД традиционных плавильных агрегатов, применяемых в литейных и металлургических цехах [1].

В РНП при передаче тепла шихтовым материалам решающую роль играет конвективный теплообмен между потоком горячих газов (продуктов сжигания газообразного или жидкого топлива) и шихтой, находящейся в условиях динамического продуваемого слоя. При этом объемный коэффициент теплопередачи ( $\alpha_v$ ) достигает значений  $(2-3) \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>3</sup>·К), что на три порядка выше, чем при нагреве неподвижного слоя.

В общем случае нагрев дисперсного материала в слое может быть описан параболой [2]:

$$t = t_0(h + 1)^n,$$

где  $t_0$  – температура на поверхности слоя;  $h$  – текущая относительная толщина слоя;  $n = k\alpha_v$ , ( $\alpha_v$  – объемный коэффициент теплопередачи;  $k$  – эмпирический коэффициент, характеризующий нагреваемый материал, для дисперсных металлоотходов  $n = 0,5-3,5$ ).

В свою очередь  $\alpha_v = f(v_r)$ , в первом приближении можно принять, что объемный коэффициент теплопередачи в продуваемом слое пропорционален относительной скорости газового потока в степени 0,5–0,8.

От скорости газового потока зависит и глубина проникновения газов в слой дисперсных материалов, которая в общем случае определяется скоростным напором газового потока, преодолевающим внутреннее сопротивление слоя ( $\Delta P_c$ ):

$$\Delta P_c \leq k_c \frac{136v_{\Gamma}^2 \rho_{\Gamma}}{273 + t},$$

где  $k_c$  – эмпирический коэффициент, характеризующий слой материала.

Таким образом, передача тепла и интенсивность прогрева слоя материала за счет конвекции тем выше, чем выше скорость газа теплоносителя, турбулентность потока и интенсивнее перемешивание самого слоя. Все эти факторы в полной мере обеспечиваются в ротационных наклоняющихся печах.

В РНП благодаря сложному петлеобразному движению газового потока относительные скорости газов на поверхности материала достигают 20–30 м/с, что недопустимо в традиционных короткобарабанных или вращающихся трубчатых печах с прямооточным движением газов в связи с опасностью уноса дисперсных частиц. Кроме того, петлеобразное движение обеспечивает и более длительное пребывание газового потока в рабочем пространстве печи. Это, а также интенсивное перемешивание материала, находящегося в РНП, не только в радиальном (как в печах с горизонтальной осью вращения), но и в осевом направлении, позволяет значительно увеличить интенсивность всех тепломассообменных процессов.

Исследовать характер движения неизотермических турбулентных высокоскоростных газовых потоков в РНП, а тем более дать их количественную оценку только с опорой на натурные эксперименты или физическое моделирование невозможно. Точные ответы можно получить только путем численного (компьютерного) моделирования.

### Методика и результаты исследования

Как правило, расчеты тепломассопереноса в печах базируются на исходных данных о режимах движения, которые задаются исходя из усредненных параметров или балансовых интегральных величин. Однако в таких агрегатах как РНП, характеризующихся высокими скоростями процессов, такой подход является непродуктивным и приводит к принципиальным ошибкам.

Для математического описания движения газов в РНП использовали систему уравнений Навье-Стокса для реальных неизотермических потоков, уравнения неразрывности, сохранения энергии и состояния, процессы теплопередачи описывали с помощью уравнения Фурье-Кирхгофа [2, 3].

Тепловой баланс проверялся путем совместного решения для тех же исходных данных уравнения Фурье с граничными условиями III рода для динамического слоя материала при замене коэффициента теплопроводности ( $\lambda$ ) на приведенный коэффициент теплообмена ( $\alpha_{\text{пр}}$ ) для продуваемого слоя:  $\alpha_{\text{пр}} = \alpha_k d_{\text{экв}}$ , где  $\alpha_k$  – коэффициент конвективной теплопередачи;  $d_{\text{экв}}$  – характерный размер (эквивалентный диаметр) частиц материала.

Для исследования аэродинамических и тепловых процессов, протекающих в РНП в условиях высоких градиентов температур и скоростей, были использованы прикладные программные пакеты (ППП) ANSYS CFX и Solid Works Flow Simulation [4].

Расчетная область включала в себя рабочее пространство печи с полной загрузкой. В качестве основного топлива был принят природный газ (метан), а в качестве окислителя – воздух при соотношении 1/10 с варьированием в процессе исследований в диапазоне от 1,2 до 0,6.

Результатами численного моделирования являются поля температур, скоростей, давлений, траектории движения газового потока, концентрации топлива, окислителя, продуктов реакции, а также конвективные и лучистые потоки тепла.

Исследования выполняли на виртуальной трехмерной модели РНП, построенной с использованием ППП SolidWorks 14.0 (рис. 1, а), которая затем с помощью генератора ANSYS Meshing была разбита на сетку с количеством элементов 290 665 (рис. 1, б).

В качестве параметров расчета были использованы следующие модели: модель вязкого газа при постоянном давлении (constant p); модель турбулентности; модель адиабатической стенки (Adiabatic Wall) с учетом поверхностных напряжений трения (без проскальзывания – NoSlip).

Схема решения уравнений: решатель высокой точности – HighResolution, максимальное число итераций – 100, критерий сходимости (порог невязок) –  $10^{-4}$  по каждой основной расчетной величине. Форма проведения расчета: распараллеливание по схеме MPI с автоматическим разбиением сеточной модели на основе алгоритма MeTis.

Граничные условия задавались следующим образом:

- граница входа Inlet 1: расход природного газа, м<sup>3</sup>/ч; расход воздуха, м<sup>3</sup>/ч;
- свободный выход Open: статическое давление на выходе (StaticPressure for Entrainment), Па; статическая температура (StaticTemperature), К;

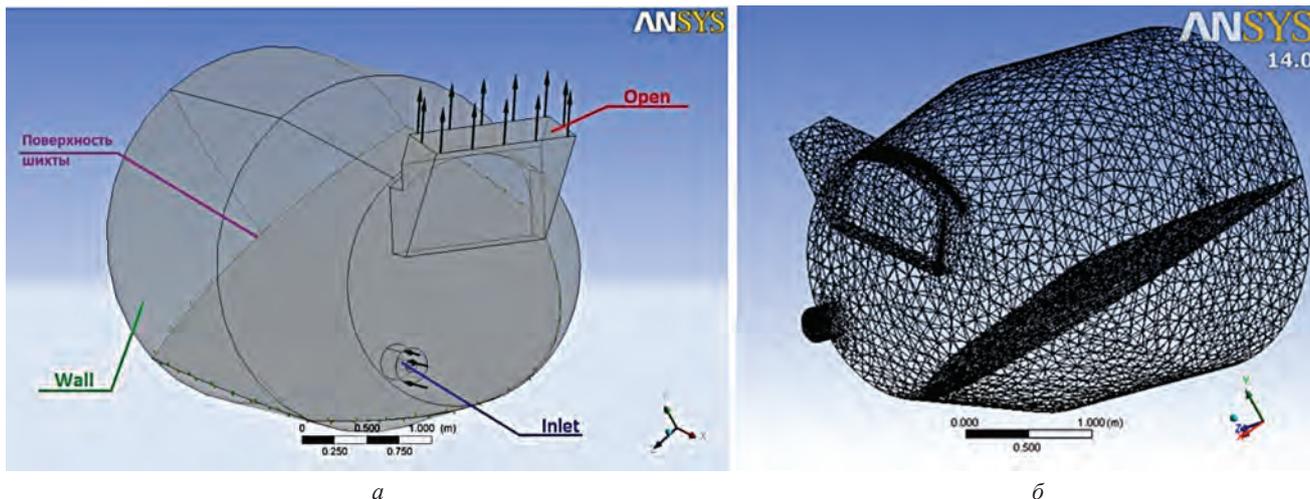


Рис. 1. Трехмерная модель ротационной печи (а) и расчетная конечно-элементная сетка (б)

- стенка печи – адиабатическая стенка (AdiabaticWall) с учетом поверхностных напряжений трения без проскальзывания;
- шихтовой материал – пористое проницаемое тело.

Выбор в качестве граничных условий составляющих скорости и статического давления на выходе является наиболее устойчивым для решения уравнений. Размер расчетной модели и продолжительность расчета позволяют уменьшить использование условия симметрии.

Для моделирования турбулентных течений уравнения усредняются по Рейнольдсу, т. е. используется усредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения усредненных газодинамических параметров потока (давления, скоростей, температуры) учитываются введением соответствующих производных по времени. Эта система уравнений сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения имеет следующий вид в декартовой системе координат  $(x_i, i = 1, 2, 3)$ , вращающейся вокруг оси, проходящей через ее начало:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial \rho_i}{\partial x_i} = S_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P)u_k + q_k) - \tau_{ik} u_i = S_k u_k + Q_H \quad (3)$$

где  $t$  – время;  $u$  – скорость потока;  $\rho$  – плотность среды;  $P$  – давление потока;  $S_i$  – внешние массовые силы, действующие на единичную массу потока;  $E$  – полная энергия единичной массы потока;  $Q_H$  – тепло, выделяемое источником в единичном объеме потока;  $\tau_{ik}$  – тензор вязких сдвиговых напряжений по координатам;  $q_i$  – диффузионный тепловой поток.

Для газов используется уравнение состояния идеального газа:

$$p_t = \rho_t R T, \quad (4)$$

где  $R$  – газовая постоянная моделируемого газа.

Наряду с моделированием диффузии тепла в текучей среде моделируется также теплопередача в твердых телах (в слое шихты) с помощью уравнения Фурье:

$$\frac{\partial (\rho e)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H, \quad (5)$$

где  $e = cT$  – удельная теплоемкость;  $T$  – температура;  $\lambda$  – теплопроводность.

Для дискретизации дифференциальных уравнений используется метод конечных объемов [3, 4]. Собственно дискретизация рассмотренной непрерывной математической модели состоит в том, что зна-

чения физических переменных рассчитываются в центрах расчетных ячеек, а на границах этих ячеек определяются потоки массы, импульса, энергии, необходимые для расчета этих значений.

Пространственные производные аппроксимируются с помощью неявных разностных операторов второго порядка точности. А именно, полученное из уравнений (1)–(5) интегрированием по поверхности и объему ячейки расчетной сетки интегральное уравнение:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V U dV + \oint_S F dS = \int_V Q dV, \quad (6)$$

где  $U$  – вектор физических параметров (независимых переменных);  $V$  – объем ячейки;  $F$  – потоки;  $S$  – площадь поверхности (граней) ячейки;  $Q$  – массовые силы, преобразуется в дискретную форму:

$$\frac{\partial}{\partial t} (UV) + \sum_S FS = QV. \quad (7)$$

Потоки  $F$  рассчитываются с использованием их аппроксимаций второго порядка.

При моделировании движения газов в РНП были приняты исходные данные, характерные для условий рециклинга дисперсных отходов черных металлов: температура факела на входе – 1500–1750 °С, объем рабочего пространства – 10 м<sup>3</sup>, соответственно номинальный расход природного газа – 200–300 м<sup>3</sup>/ч, угол наклона печи в рабочем положении – 15°, вращение печи со скоростью – 1–5 об/мин. Параметры шихтовых материалов принимались в соответствии с характеристиками окалины, чугуновой и стальной дробленой стружки.

Течение газов в РНП носит сложный петлеобразный циркуляционный характер. Газовый поток образует циркуляции как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях, причем при определенных режимах может происходить смена направления вращения. Скорости взаимодействия газов с материалом в РНП в несколько раз выше поступательной (осевой) скорости потока, что соответственно интенсифицирует теплообмен и уменьшает унос высокодисперсных фракций материала и пыли.

Конфигурация и взаимодействие газового потока с дисперсным материалом зависят не только от режима работы горелок, вращения печи и скорости газового потока, но и от расположения горелок, их числа и угла атаки – направления оси факела по отношению к поверхности материала.

Параметрами потока и соответственно тепломассообмена можно управлять, меняя вектор скорости газов на входе в рабочее пространство, например, изменяя расположение и угол установки горелки на крышке печи.

При расположении горелки со сдвигом от вертикальной оси симметрии вправо (в нижней правой четверти крышки) и вращении печи против часовой стрелки горячий поток продуктов сжигания топлива практически сразу на выходе из горелки сталкивается со слоем шихты. При этом из-за большого сопротивления со стороны материала основная часть горячего потока отклоняется вверх, успевая проконтактировать только с частью (50–60%) поверхности материала (рис. 2). После перемены направления движения поток по радиальной траектории движется вдоль стенки печи, отдавая тепло футеровке, а не материалу. На выходе из печи газы подсасываются входящим потоком в районе факела, образуя большую циркуляционную зону, занимающую почти 1/3 печного пространства.

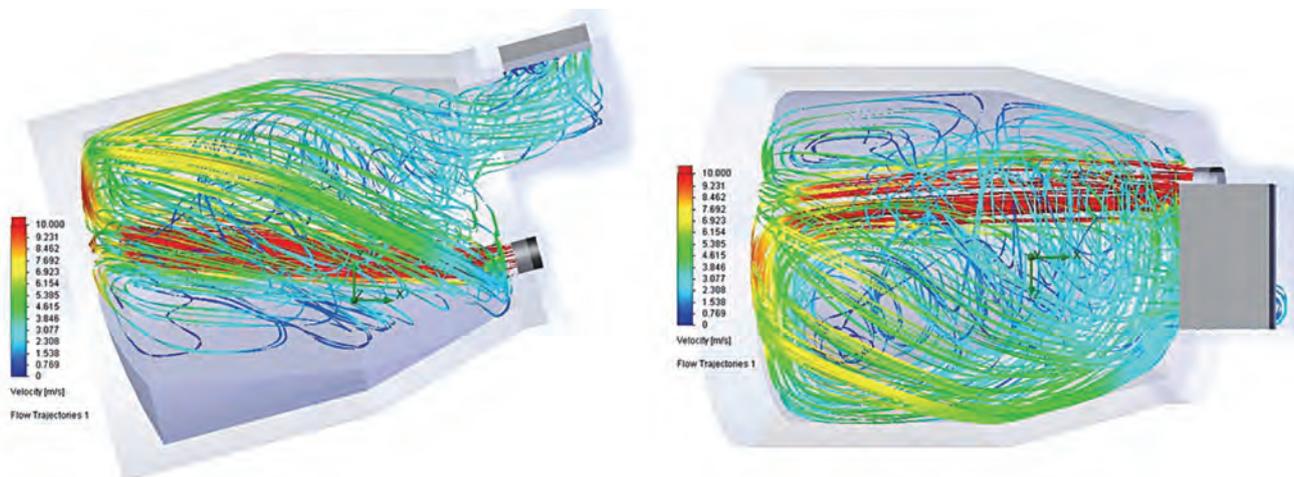


Рис. 2. Траектории движения и скорости газовых потоков при расположении горелки справа от вертикальной оси при вращении печи против часовой стрелки

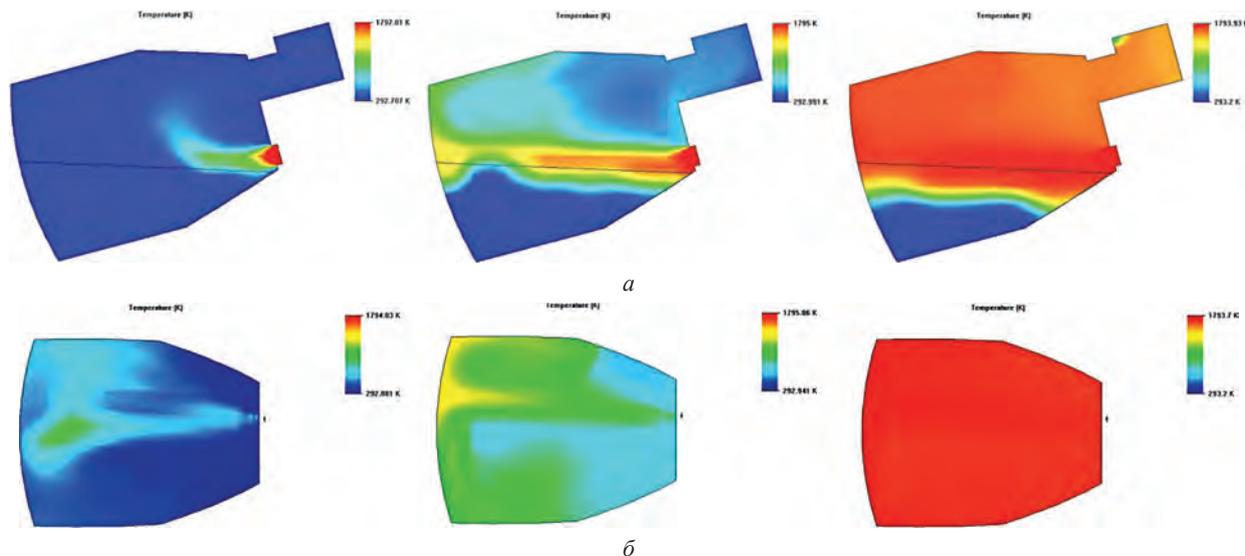


Рис. 3. Распределение температур в ротационной печи и их изменение во времени при расположении горелки справа: *a* – вид сбоку (распределение температур в вертикальных сечениях); *б* – вид сверху (распределение температур в горизонтальных сечениях печи)

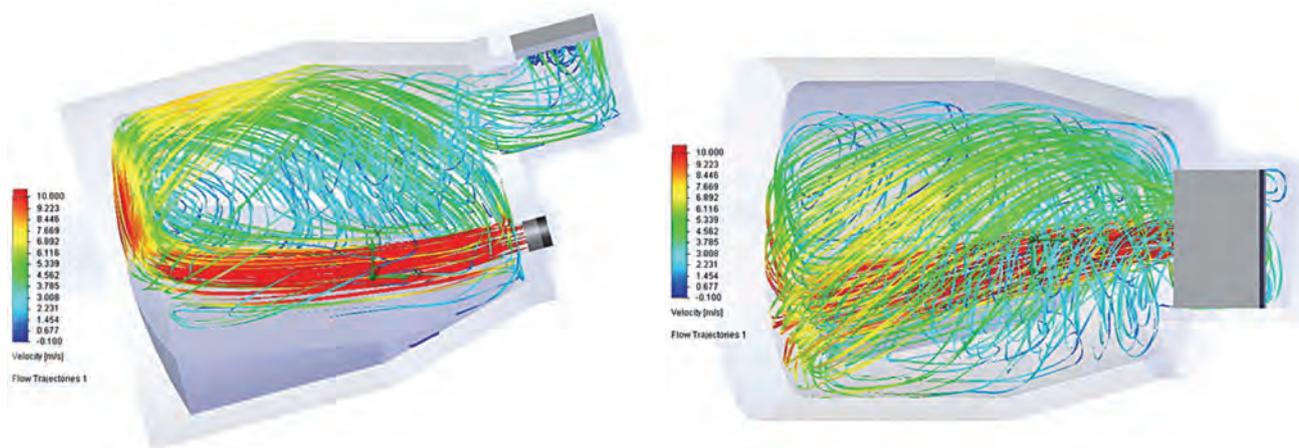


Рис. 4. Траектории движения и скорости газовых потоков при расположении горелки по центру

В результате материал в передней части печи прогревается меньше, чем у днища (рис. 3). Вихревые потоки в циркуляционной зоне препятствуют проникновению нагретого потока в глубь материала, нагрев совершается в основном за счет перемешивания материала и теплопроводности при контакте с футеровкой. На горизонтальных сечениях видно, что правая половина рабочего пространства прогревается значительно больше левой, что влечет за собой неравномерный нагрев материала и футеровки печи и, как следствие, удлинение цикла плавки, увеличение расхода топлива, уменьшение срока службы футеровки, повышение угара металлических компонентов шихты.

При расположении горелки по центру (рис. 4) она может быть установлена ниже. Это увеличивает настильность пламени и обеспечивает передачу большего количества тепла материалу за счет конвекции, а не только излучением от пламени и стенок печи.

Нагретый поток, пройдя по верхнему слою шихты, доходит до днища печи, поднимается по поверхности футеровки и затем по винтообразной траектории покидает рабочее пространство. Двигаясь вдоль поверхности шихты, газы проникают в материал, отдавая тепло, и способствуют его перемешиванию.

К материалу, находящемуся слева от оси факела, приходит незначительная часть горячего потока, его нагрев в основном осуществляется излучением от факела и за счет перемешивания (рис. 5).

Циркуляционная зона находится в центре печного пространства и смещена к дымоходу, при таком расположении она практически не оказывает негативного влияния на теплообмен и не создает препятствий горячим газам, контактирующим с шихтовым материалом.

При расположении горелки слева (рис. 6) пламя практически не испытывает никакого сопротивления со стороны материала, так как слева толщина слоя минимальна. При выборе соответствующего угла

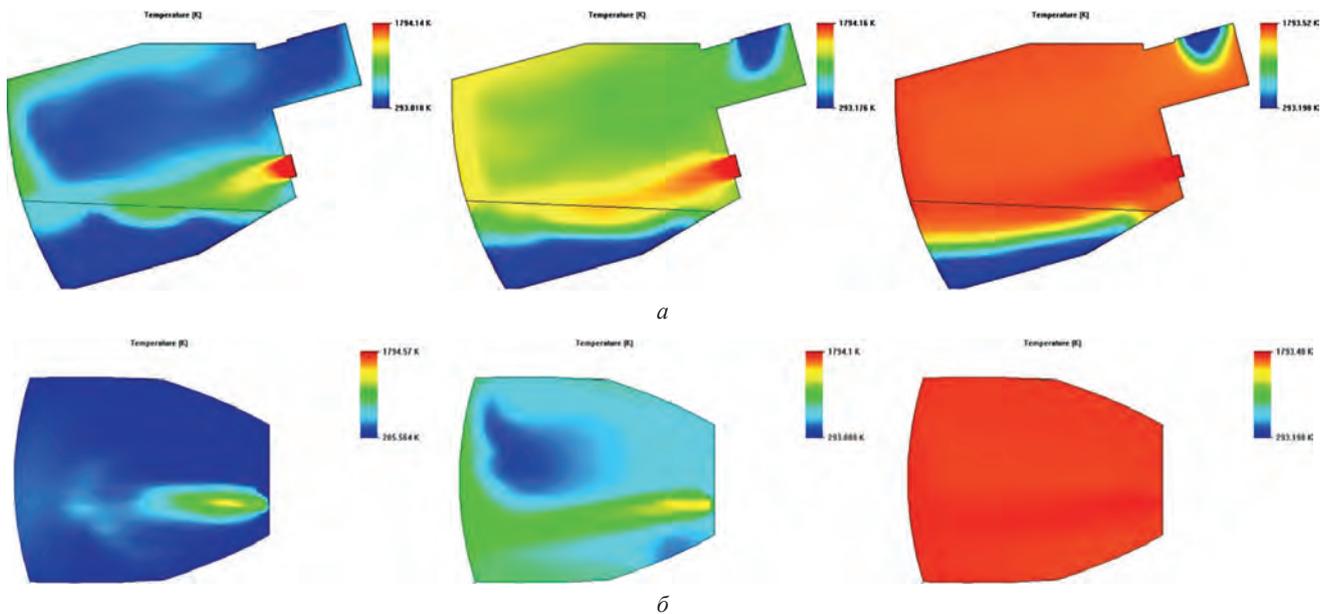


Рис. 5. Распределение и изменение температур в РНП при расположении горелки по центру: *a* – вид сбоку (сечение по горелке); *б* – вид сверху (распределение температур на поверхности шихты)

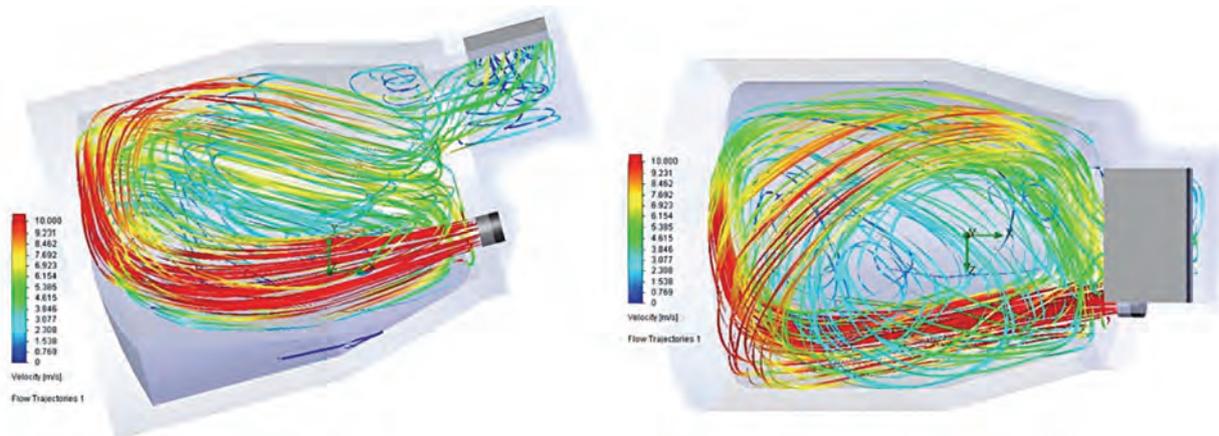


Рис. 6. Траектории движения и скорости газовых потоков при расположении горелки слева

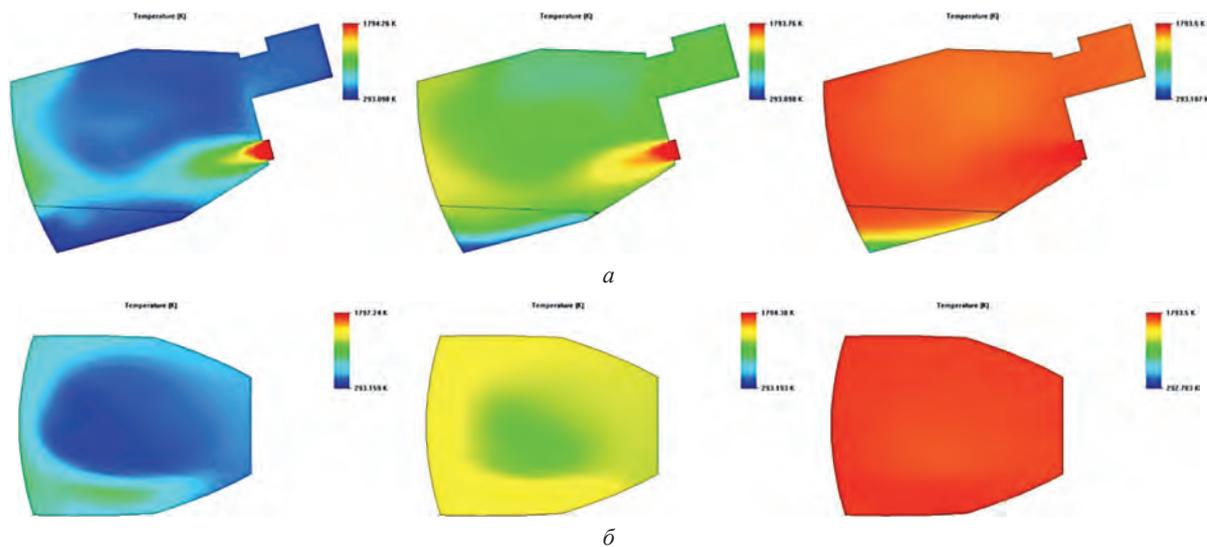


Рис. 7. Распределение и изменение температур в РНП при расположении горелки слева: *a* – вид сбоку (сечение по горелке); *б* – вид сверху (распределение температур на поверхности шихты)

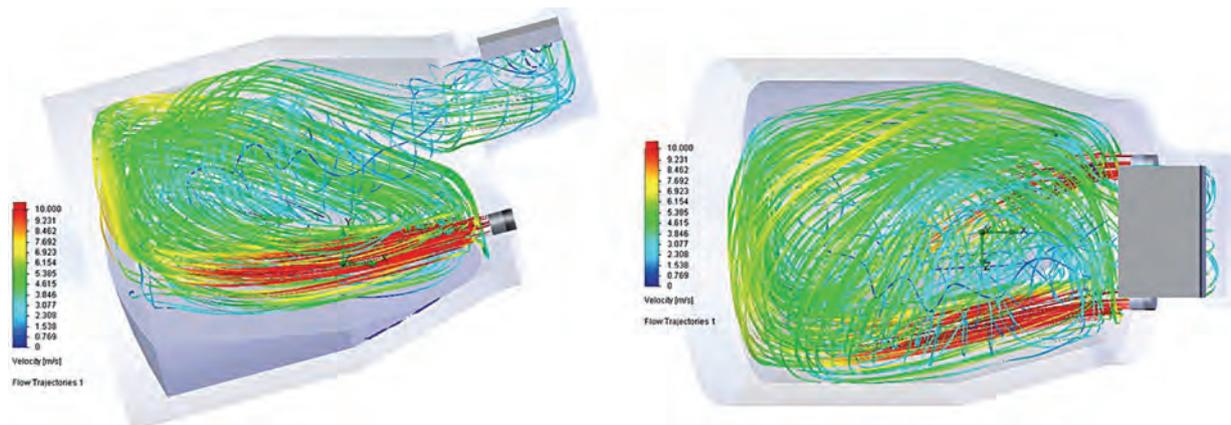


Рис. 8. Траектории движения и скорости газовых потоков при установке двух горелок

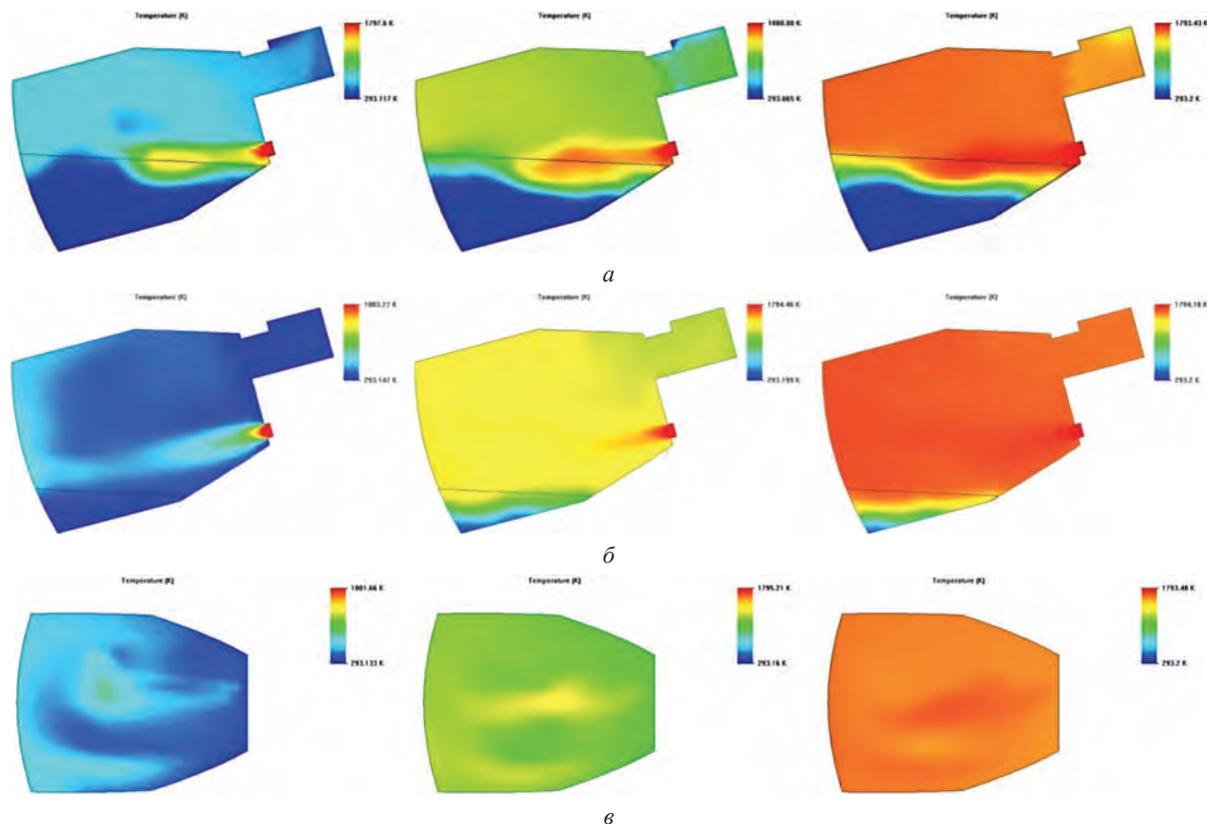


Рис. 9. Распределение и изменение температур в РНП при установке двух горелок: *а, б* – вид сбоку (сечения по горелкам); *в* – вид сверху (температурные поля на поверхности шихты)

атаки может быть обеспечена максимальная настильность потока и эффективность теплопередачи: газы по широкой дуге омывают всю поверхность материала и глубоко проникают в слой.

Циркуляционная зона образуется около патрубка отвода газов и практически не влияет на теплообменные процессы в рабочем пространстве печи. Из рис. 7 видно, что прогрев материала осуществляется равномерно по всей поверхности слоя. Равномерное распределение температурных полей и большая глубина проникновения газового потока в слой обеспечивают увеличение темпа нагрева материала в 1,3–1,5 раза по сравнению с вариантом расположения горелки справа.

Для крупных печей большой емкости (с объемом рабочего пространства 12–15 м<sup>3</sup> и более) может быть использован вариант с установкой двух горелок при сохранении суммарного расчетного расхода газа (рис. 8).

При таком варианте поток из левой горелки совершает петлю аналогично варианту с одной горелкой. Поток из правой горелки из-за сопротивления со стороны слоя смещается и объединяется с потоком из левой горелки, увеличивая суммарную мощность потока. Происходит максимально возможное внедрение горячих газов в поверхностный слой материала (рис. 9).

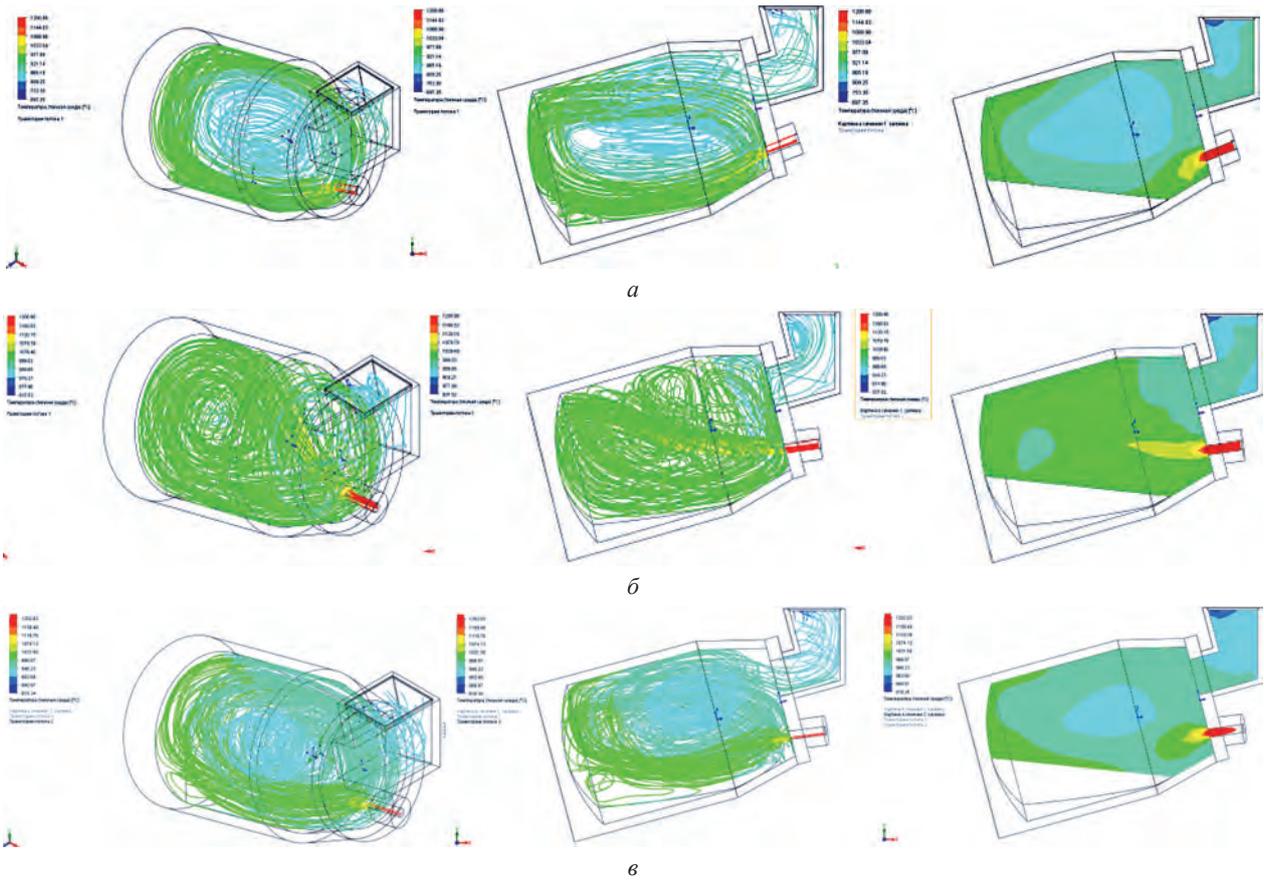


Рис. 10. Траектории движения газов и поля температур в РНП: *а* – установка горелки с углом наклона  $5^\circ$  вниз относительно оси печи; *б* – установка горелки с углом наклона  $7,5^\circ$  вверх относительно оси печи; *в* – установка горелки с углом наклона  $7,5^\circ$  вверх относительно оси печи и  $7,5^\circ$  вправо в сторону материала

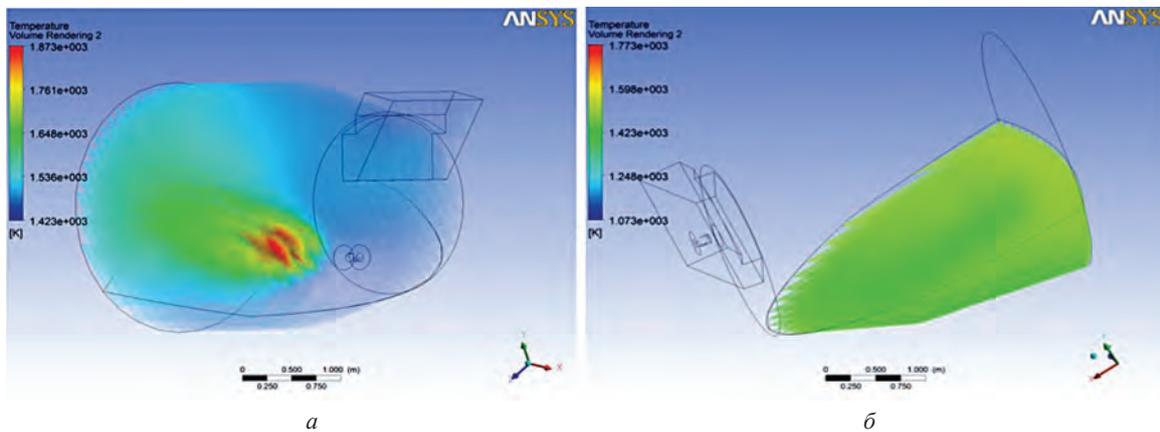


Рис. 11. Поля температур в ротационной печи: *а* – распределение температур в рабочем пространстве; *б* – распределение температур в объеме шихты

Эффективность и равномерность нагрева материала в значительной степени зависят также от угла атаки, который определяется положением оси горелки по отношению к поверхности материала, чему ранее не уделялось должного внимания. Результаты моделирования движения газового потока при различных углах поворота горелки приведены на рис. 10.

Наиболее эффективный нагрев дает вариант (рис. 10, *в*) при расположении горелки под углом  $7,5^\circ$  вверх относительно оси печи и  $7,5^\circ$  в сторону материала. Такое расположение горелки обеспечивает хорошую настильность пламени и равномерный прогрев верхнего слоя материалов как в твердой фазе, так и после расплавления, когда жидкая ванна занимает практически горизонтальное положение.

Эффективная работа РНП возможна только при условии, когда газовый поток омывает материал, находящийся у дна печи. Для этого динамический напор газового потока должен быть выше суммарно-

го сопротивления потоку, включая сопротивление пересыпающегося слоя материала. Компьютерное моделирование дает возможность определить наиболее эффективное как по удельным расходам компонентов, так и по конструктивным параметрам техническое решение. Каждому типоразмеру печи соответствует оптимальная длина факела.

Моделирование позволяет получить данные о распределении температур в рабочем пространстве печи как в газовой фазе, так и в объеме материала. На рис. 11 показано распределение температур в РНП на стадии перехода от нагрева шихты к жидкой фазе: температура в факеле составляет  $\sim 1600$  °С, далее часть тепла переходит в материал, средняя температура по шихте –  $\sim 1300$  °С, на выходе из печи температура –  $1000\text{--}1200$  °С.

### Выводы

Численное моделирование и расчет тепломассообменных процессов, происходящих в ротационных наклоняющихся печах при термообработке дисперсных материалов, позволяют не только представить качественную картину движения газов и материалов в РНП, но и определить количественные значения параметров тепломассопереноса.

Установлено, что движение газов в РНП характеризуется сложным циркуляционным режимом. Циркуляции происходят как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Циркуляционные скорости в 3–5 раз и более превышают скорость движения газового потока вдоль оси печи, что обеспечивает значительную интенсификацию процессов теплообмена при минимальном уносе дисперсных частиц.

Характер движения газов в РНП и эффективность работы печи существенно зависят от скорости и направления (угла атаки) факела газовых горелок, а также от их расположения и параметров. РНП является тепловым агрегатом с возможностью управления вектором скорости газового потока, что позволяет в процессе плавки и нагрева, не меняя конструктивных параметров печи, в широких пределах изменять (регулировать) интенсивность технологических процессов.

На основе полученных результатов определены параметры эффективной и экономичной работы ротационных наклоняющихся печей, разработаны и апробированы на практике рекомендации по их проектированию и применению.

### Литература

1. Ровин С. Л., Ровин Л. Е., Заяц Т. М. Металлургические достоинства ротационных наклоняющихся печей // *Литье и металлургия*. 2010. № 4. С. 40–44.
2. Зобнин Б. Ф., Казяев М. Д., Китаев Б. И. и др. *Теплотехнические расчеты металлургических печей*. М.: Металлургия, 1982. 360 с.
3. Арутюнов В. А., Бухмиров В. В., Крупеников С. А. *Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей*. М.: Металлургия, 1990. 412 с.
4. Алямовский А. А. *Solid Works. Компьютерное моделирование в инженерной практике*. СПб.: БВХ – С. Петербург, 2005. 800 с.

### References

1. Rovin S. L., Rovin L. E., Zajac T. M. Metallurgical advantages of rotary kilns evading. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and Metallurgy*, 2010, no. 4, pp. 40–44.
2. Zobnin B. F., Kazjaev M. D., Kitaev B. I. *Teplotekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechej* [Thermal calculations of metallurgical furnaces]. Moscow, Metallurgija Publ., 1982, 360 p.
3. Arutjunov V. A., Buhmirov V. V., Krupennikov S. A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovoj raboty promyshlennyh pechej* [Mathematical modeling of the thermal performance of industrial furnaces]. Moscow, Metallurgija Publ., 1990, 412 p.
4. Aljamovskij A. A. *Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoj praktike* [Computer modeling in engineering practice]. St.-Peterburg. BVH Publ., 2005. 800 p.