

# ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ РОТАЦИОННЫХ КАЧАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

**Я. И. Радькин**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого», Беларусь*

Научный руководитель Т. М. Заяц

На сегодняшний день одной из важнейших задач металлургии является утилизация и переработка металлосодержащих отходов, к которым относятся окалина, стружка, мелкий низкосортный скрап, шламы и т. п.

Возврат в производство металлосодержащих отходов позволит частично сократить затраты на приобретение шихтовых материалов, а также решить ряд экологиче-

ских проблем, связанных с сокращением образования и переработкой уже накопленных отходов.

В настоящее время на базе кафедры «Металлургия и литейное производство» осуществляется разработка ротационных качающихся печей для переработки данных отходов.

В связи с тем, что в ротационных печах принципиально по-новому организовано движение теплоносителя, имеет место петлеобразное течение потока газов в пространстве печи, необходимо исследовать режимы течения газов и теплообмен в рабочем пространстве.

Течение газов в ротационных печах отличается сложностью и несимметричностью потоков, сочетанием прямых и обратных токов, наличием циркуляционных зон. Моделирование позволит оптимально выбрать соотношения сечений входного и выходного отверстий, а также рационально определить расход газовой смеси необходимый для наиболее эффективной работы. В рабочей зоне печи необходимо, чтобы перерабатываемый материал контактировал с наиболее нагретыми потоками, при этом будет достигаться максимальный эффект теплообмена.

Моделирование проводилось с помощью ППП SolidWorks Flow Simulation – это универсальный модуль для анализа гидрогазодинамики и теплопередачи, основанный на методе конечных элементов. В SolidWorks Flow Simulation движение потока моделируется с помощью уравнения Навье–Стокса, а теплообмен уравнением Фурье, которые описывают в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды. Кроме того, используются уравнения состояния компонентов потока, а также эмпирические зависимости вязкости и теплопроводности компонентов среды от температуры.

Для моделирования турбулентных течений упомянутые уравнения Навье–Стокса усредняются по Рейнольдсу, т. е. используется осредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения осредненных по малому масштабу времени составляющих 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 с угловой скоростью  $\Omega$  вокруг оси, проходящей через ее начало:

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

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

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

где  $t$  – время;  $u$  – скорость потока;  $\rho$  – плотность текучей 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;  $k$  – кинетическая модель турбулентности;  $\tau_{ik}$  – тензор вязких сдвиговых напряжений;  $q_i$  – диффузионный тепловой поток, нижние индексы означают суммирование по трем координатным направлениям.

Для сжимаемых текучих сред используется уравнение состояния следующего вида:

$$p = \rho(P, R, y), \quad (4)$$

где  $y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$  – вектор концентраций компонентов потока. Для газов используется уравнение состояния идеального газа  $p = P/(RT)$ , где  $R$  – газовая постоянная моделируемого газа.

Наряду с моделированием диффузии тепла в текучей среде моделируется также теплопередача в твердых телах 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;  $Q_H$  – удельное тепловыделение источника тепла.

Конвективный теплообмен между поверхностью твердых тел и текучей средой моделируется при моделировании пограничного слоя потока текучей среды. Если теплопередача в твердых телах моделируется, то одновременно может моделироваться также радиационный теплообмен между непрозрачными для него поверхностями твердых тел. При этом рассматривается только интегральное, т. е. суммарное по всем длинам волн, излучение.

Если текучая среда проходит через пористое тело, то влияние этого тела на параметры течения моделируется как рассредоточенное гидравлическое сопротивление. Скорость потока текучей среды в пористом материале определяется по заданной эффективной пористости данного материала, которая представляет собой объемную долю соединяющихся между собой пор в общем объеме пористого материала.

В качестве первоначальных параметров были заданы: расход газа  $750 \text{ м}^3/\text{ч}$ , соотношение газ-воздух  $1/10$ , входное сечение подачи газовой смеси  $S_{\text{вх}} = 0,06 \text{ м}^2$ , сечение отверстия выхода газов  $S_{\text{вых}} = 0,87 \text{ м}^2$ .

Так как печь в процессе работы вращается, то шихта не лежит параллельно горизонта, а находится под углом, этот угол определяется скоростью вращения печи. В ходе моделирования было выявлено, что важную роль для траектории движения газа играет расположение газовой горелки по отношению к положению шихты при вращении. Так, при расположении горелки справа наблюдается резкий подъем потока вверх по поверхности материала (рис. 1, а), образуется сразу несколько циркуляционных зон, при этом наиболее нагретые газы будут контактировать только с 35–45 % поверхности перерабатываемого материала.

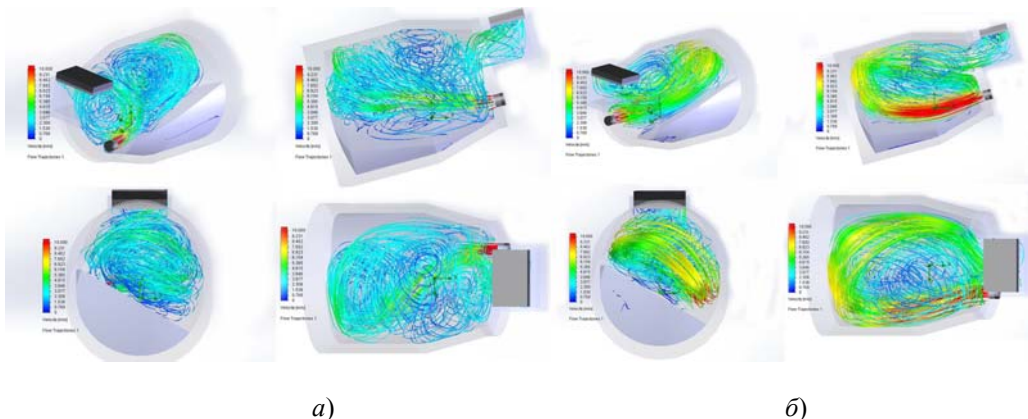
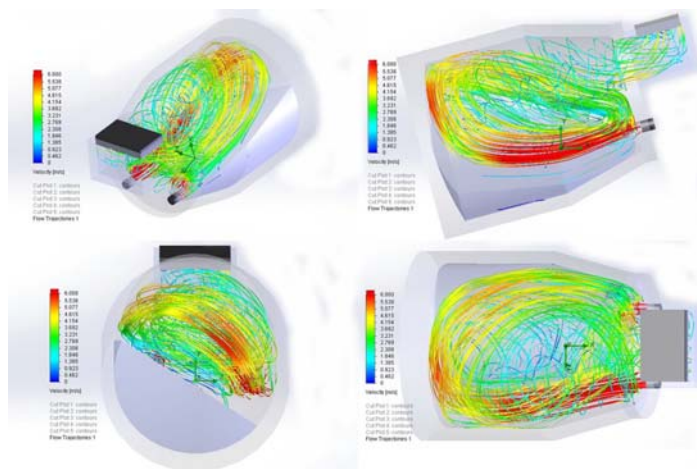


Рис. 1. Траектория движения газов в ротационной качающейся печи (одна горелка)

Однако при расположении газовой горелки слева (рис. 1, б), данный негативный эффект исчезает, более того, происходит максимальный контакт горячих газов с переплавляемым материалом. В этом случае наблюдается петлеобразное движение газов, т. е. нагретый поток обтекает необходимую поверхность, происходит максимальная передача теплоты, затем он устремляется к выходному отверстию, и лишь незначительная часть захватывается входным потоком, при этом подсасываемая часть смеси движется в верхних слоях потока и гарантированно покидает пространство печи при следующем цикле. При петлеобразном движении потока нагретые газы будут долго оставаться в пространстве печи, а значит, будет происходить более интенсивный теплообмен. Следовательно, длительность процесса восстановления займет меньше времени, и поэтому уменьшатся энергозатраты (расход газа).

При установке на агрегат второй горелки наблюдаются следующие траектории движения газов (рис. 2). В пространстве агрегата отсутствуют циркуляционные зоны. Горячий поток несколько раз проходит по петле, контактируя с материалом, что является положительным фактором, после чего поток остывших газов по спирали из центра печи уходит через выходное отверстие из рабочей зоны.



*Рис. 2. Траектория движения газов в ротационной качающейся печи (две горелки)*

Произведенное моделирование позволило определить, что наиболее оптимальным вариантом является установка на ротационную печь двух горелок.