

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУЖКИ

### ЧАСТЬ 3

*Канд. техн. наук, доц. ДЬЯКОНОВ О. М.*

*Белорусский национальный технический университет*

**Краткое описание алгоритма численного решения.** В [1, 2] была представлена физико-математическая модель процесса нагрева металлической стружки в проходной муфельной печи. В настоящей работе мы остановимся на методике численного решения этой модели и проведем анализ результатов с целью оптимизации параметров нагрева и оборудования.

Изначально задаем все теплофизические свойства (плотность, теплоемкость, теплопроводность, степень черноты) в диапазоне температур 20–1100 °С для материалов, участвующих в процессе нагрева: стружки, муфельной трубы, дымовых газов, шамотного кирпича и легковесного шамота, асбеста и стали, из которой изготовлен корпус печи. Задаем также начальную температуру стружки, температуру окружающей среды  $T_0$ , температуру воздуха, подаваемого на горение, а также состав и теплофизические свойства СОЖ. Всю печь по высоте разбиваем на 30–50 зон так, что высота каждой зоны составляет около 10 см. Задаем главный параметр – расход природного газа. Далее алгоритмическая схема решения выглядит следующим образом:

1) задаем линейный профиль температуры дымовых газов по высоте печи. Внизу печи температуру дымовых газов  $T_{gas,in}$  определяем термодинамическим расчетом по коэффициенту избытка воздуха, подаваемого в горелки, и по теплофизическим свойствам природного газа, воздуха и дымовых газов усредненного состава. Так, при  $\alpha_{air} = 1,85$   $T_{gas,in} \approx 1000$  °С.

Температуру дымовых газов на выходе из печи принимаем  $T_{gas,out} \approx 400$  °С;

2) последовательно проходим все зоны печи сверху (со стороны загрузки стружки) донизу печи. Для каждой зоны выполняем операции 3–8;

3) температуру наружной поверхности стенок печи в  $i$ -й зоне принимаем  $T_{w,out}^{(i)} = T_0 + 20$ , где  $T_{gas}^{(i)}$  – температура дымовых газов в  $i$ -й зоне;

4) задаем диапазон температур для внутренней поверхности стенок печи в  $i$ -й зоне от  $T_{w,in}^{(i)} = T_1 = T_{gas}^{(i)} - 0,1$  до  $T_{w,in}^{(i)} = T_2 = T_{gas}^{(i)} - 100$ ;

5) численно решаем задачу радиационно-конвективного теплообмена для заданной температуры внутренней поверхности стенки. Температуру поверхности муфельной трубы при этом определяем итерациями по падающему потоку на основе соотношения, приведенного в [2]. Методом половинного деления путем многократного решения задачи радиационно-конвективного теплообмена внутри печи находим температуру внутренней поверхности стенок  $T_3 \in (T_1, T_2)$ , при которой суммарный тепловой поток, падающий на внутреннюю поверхность печи со стороны дымовых газов, положителен. Это необходимо для задания начальной точки по температуре стенки при решении задачи о распределении температуры в стенках печи в квазистационарном приближении. Эта задача имеет решение только при положительном потоке, падающем на поверхность стенки;

6) решаем задачу о распределении температуры в стенках печи в квазистационарном приближении. Для этого методом половинного деления в диапазоне  $(T_3, T_3 + 100)$  путем многократного решения задачи радиационно-конвективного теплообмена определяем температуры внутренней и наружной поверхностей стенки печи, чтобы удовлетворить в первую очередь уравнению теплового поля в этой стенке. Точность расчета температуры составляет  $0,01^\circ\text{C}$ . Из уравнений теплового поля находим также температуры на границах слоев в стенке печи. На каждом шаге температуру поверхности муфельной трубы определяем по падающему тепловому потоку на основе соотношения температур ее наружной и внутренней поверхностей;

7) для найденных температур внутренней поверхности стенок печи и поверхности муфельной трубы решаем задачу радиационно-конвективного теплообмена во внутреннем пространстве печи и находим суммарные тепловые потоки  $q_{in}$ , падающие на стружку в муфельной трубе;

8) методом конечных элементов решаем нестационарную задачу теплопередачи в стружке. Время решения задачи зависит от времени пребывания стружки в отдельно взятой зоне печи, которое определяется отношением протяженности  $i$ -й зоны к скорости перемещения стружки в муфеле. Начальное распределение температуры в стружке в  $i$ -й зоне определяем конечным распределением температуры в стружке в  $(i - 1)$ -й зоне;

9) после того как пройдены все зоны печи и в каждой из них определены тепловые потоки, падающие на муфель и стенки печи, а также распределение паров СОЖ по высоте печи, находим новый профиль температуры дымовых газов по высоте печи из решения системы уравнений зональной модели. Если максимальное отличие вновь найденного профиля температуры дымовых газов и предыдущего составляет более  $5^\circ\text{C}$ , то вычисления повторяем, начиная с пункта 3. Для сходимости и устойчивости итераций для температурного профиля дымовых газов используем следующее выражение:  $T_{gas}^{(m+1)} = (1 - \xi)T_{gas,2} + \xi T_{gas}^{(m)}$ , где  $T_{gas}^{(m+1)}$  –

температура дымовых газов в рассматриваемой точке на  $(m + 1)$ -й итерации;  $T_{gas}^{(m)}$  – то же в этой же точке на  $m$ -й итерации;  $T_{gas,2}$  – то же, полученная на  $m$ -й итерации;  $\xi$  – коэффициент корреляции. Обычно этот коэффициент выбирают в диапазоне  $\xi \approx 0,1-0,2$ .

В случае, когда необходимо найти расход газа, который обеспечивает прогрев стружки до заданной средней температуры (например,  $700^\circ\text{C}$ ), задаем диапазон расходов газа так, чтобы при меньшем расходе температура стружки на выходе из печи была меньше заданной, а при большем расходе – больше заданной. Если такой диапазон расходов газа задан, то искомый расход, обеспечивающий прогрев стружки точно до заданной температуры, с любой желаемой точностью (в рамках предложенной модели) может быть найден методом половинного деления с использованием описанного выше алгоритма вычислений.

Данная численная схема была реализована в виде компьютерной программы на языке Delphi 7. Отметим, что на процессоре Pentium 4 с тактовой частотой 2,8 ГГц расчет одной итерации (с заданным профилем температуры дымовых газов) занимает около 15 мин, для нахождения окончательного профиля температуры дымовых газов в зависимости от комбинации параметров требуется 5–20 итераций. Для нахождения оптимального расхода газа, обеспечивающего нагрев стружки до заданной температуры, необходимо выполнить расчет для 8–10 различных расходов газа. Таким образом, на указанном компьютере расчет одного оптимального варианта (комбинация: высота печи, производительность, состав СОЖ) может занимать около 15 ч.

На рис. 1 приведен общий вид конечно-элементной сетки, использованной при численном решении задачи. Расположение компонентов системы соответствует общей геометрической схеме [2].

**Результаты моделирования.** С использованием разработанной программы была проведена серия численного моделирования для определения оптимальной высоты печи для нагрева стальной стружки.

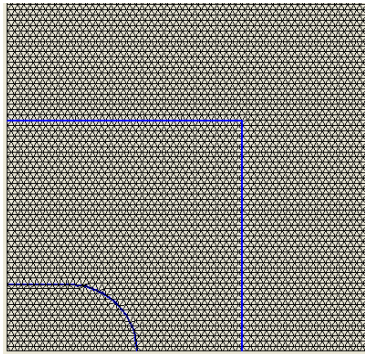


Рис. 1. Конечно-элементная сетка, использованная при численном решении задачи. Сетка содержит 4988 узлов и 9473 конечных элементов

Было рассмотрено шесть различных высот печи (2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0 м). Для каждой из указанных высот было рассмотрено три состава СОЖ с первоначальным содержанием в стружке 3 %: СОЖ I – 3 % воды и 0 масла; СОЖ II – 2,1 воды и 0,9 % масла; СОЖ III – 0 воды и 3 % масла. В остальном исходные параметры моделирования были выбраны следующим образом: температура подогрева воздуха – 100 °С; начальная температура стружки – 20 °С; конечная температура стружки – 700 °С; насыпная плотность стружки – 900 кг/м<sup>3</sup>; теплота сгорания газа – 33,5 МДж/м<sup>3</sup>; теплота сгорания масла – 40 МДж/кг; температура испарения масла – 400 °С; коэффициент избытка воздуха при сжигании природного газа в горелках – 1,85; коэффициент избытка воздуха при сжигании паров масла в рабочем пространстве печи – 3,0. Теплофизические свойства всех материалов и сред, участвующих в процессе, брались из справочной литературы, приведенной в [1, 2]. В большинстве случаев рассматривалась производительность печи 2 т стружки в час. Для отдельных случаев, в порядке сравнения, выполнялось моделирование нагрева стружки для аналогичной высоты печи, но при производительности 1 т/ч.

Качественная картина температурных полей интенсивности излучения в рабочем пространстве печи и концентраций СОЖ, полученных при моделировании процесса нагрева стружки, представлена на рис. 1, 2. Можно отметить сложный характер теплообмена при радиационном теплопереносе в пространстве муфель-

ной печи. Такая картина интенсивностей теплового излучения может быть получена только на основе решения уравнения переноса излучения, применение приближенного метода в данном случае привело бы к большим погрешностям.

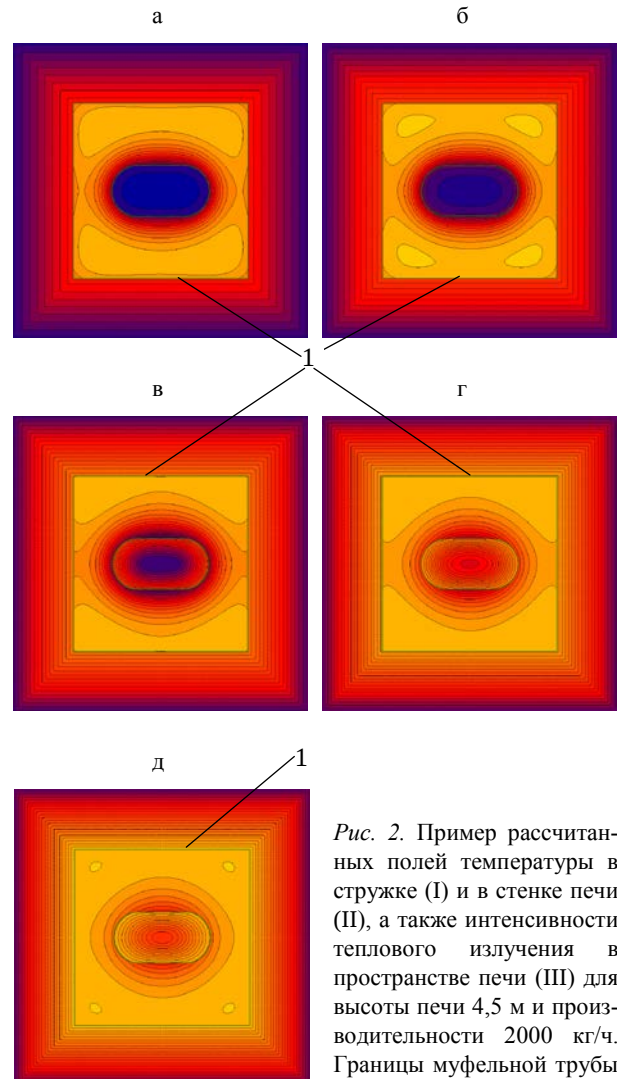


Рис. 2. Пример рассчитанных полей температуры в стружке (I) и в стенке печи (II), а также интенсивности теплового излучения в пространстве печи (III) для высоты печи 4,5 м и производительности 2000 кг/ч. Границы муфельной трубы и внутренней поверхности стенок печи изображены линиями 1. Поперечные сечения печи на высоте: а – 4,35 м; б – 3,45 м; в – 1,95 м; г – 0,9 м; д – 0,15 м

Результаты моделирования (зависимости температуры всех объектов внутри печи от координаты внутри печи), как уже отмечалось, получены для различных составов СОЖ и высот печи. В связи с большим объемом информации на рис. 2–5 приведены лишь результаты, касающиеся оптимальной высоты печи 4,5 м.

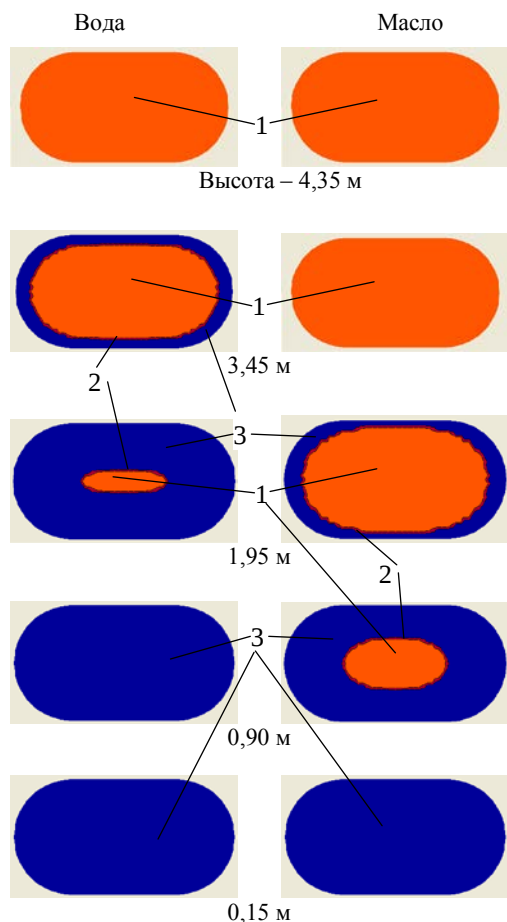


Рис. 3. Пример рассчитанных полей концентраций воды и масла в стружке для высоты печи 4,5 м и производительности 2000 кг/ч: 1 – концентрация – 100 % от начальной; 2 – концентрация 50 %, 3 – концентрация 0

Анализ полученных данных показал, что СОЖ I и II полностью испаряются для всех рассмотренных высот печи от 2,5 до 5,0 м. По мере роста высоты печи высота зоны испарения также увеличивается, что связано с уменьшением удельного расхода газа и тепловых потоков, падающих на муфель. При увеличении высоты печи сначала происходит резкое уменьшение удельного расхода газа на нагрев стружки, однако затем при высоте печи 4,0–4,5 м увеличение высоты приводит лишь к незначительному снижению расхода газа. Теплота сжигаемого газа используется тем эффективнее, чем больше площадь теплообменной поверхности. Площадь теплообменной поверхности пропорциональна высоте печи, поэтому при одинаковом расходе газа эффективнее теплота газа будет использоваться на более высокой печи. Однако сильное наращивание высоты печи приводит к тому, что дымовые газы на выходе из последней охлаждаются до сравнительно низкой температуры, так что капитальные затраты по увеличению высоты печи могут не оправдать возможную экономию природного газа.

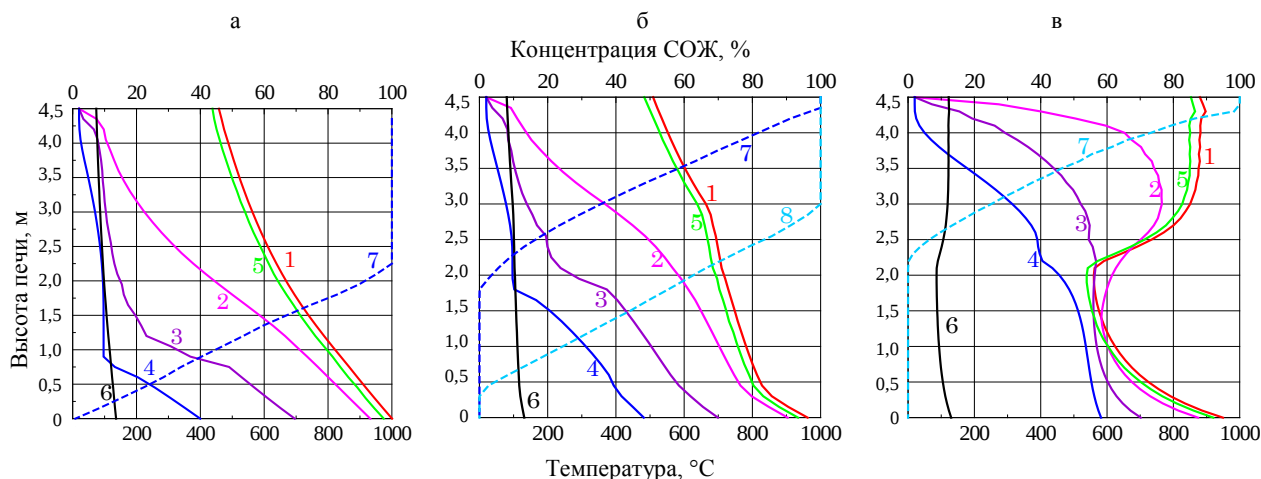


Рис. 4. Зависимость температуры и концентрации СОЖ в муфельной печи от высоты (высота печи – 4,5 м, производительность – 2000 кг/ч, первоначальное содержание СОЖ в стружке – 3 %): 1 – температура дымовых газов в печи, °C; 2 – максимальная температура стружки; 3 – средняя по поперечному сечению муфеля температура стружки; 4 – минимальная температура стружки; 5 – температура внутренней поверхности стенки печи; 6 – то же наружной поверхности стенки печи; 7 – концентрация воды в СОЖ (% от первоначального содержания); 8 – то же масла в СОЖ (% от первоначального содержания); а – СОЖ: 3 % – вода, 0 – масло; расход газа – 51,2 м³/ч; б – СОЖ: 2,1 % – вода, 0,9 % – масло; расход газа – 21,5 м³/ч; в – СОЖ: 0 – вода, 3 % – масло; расход газа – 12,44 м³/ч

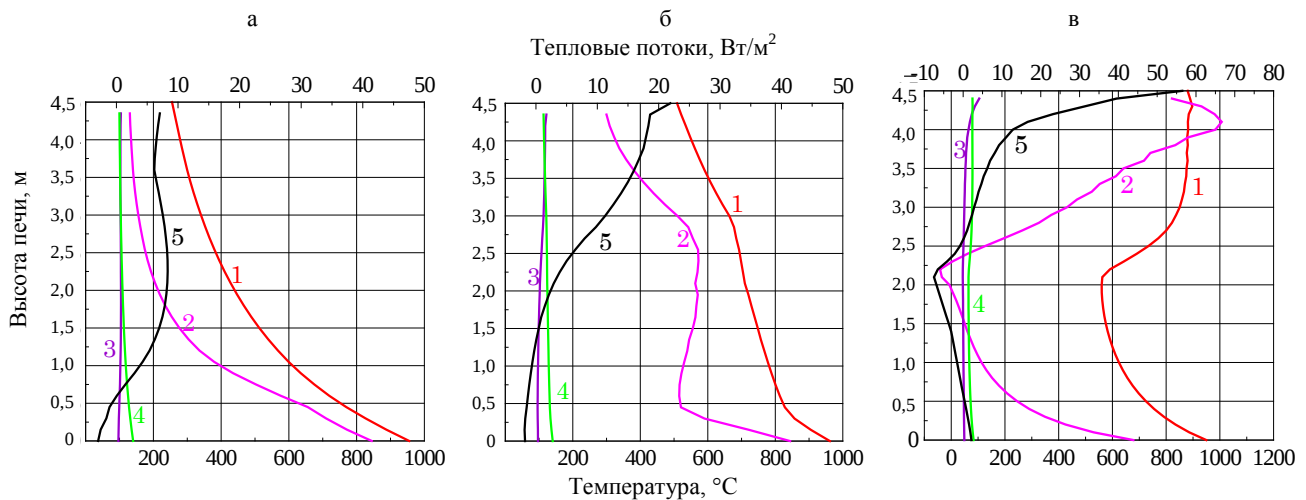


Рис. 5. Зависимость тепловых потоков в муфельной печи от высоты (высота печи – 4,5 м, производительность – 2000 кг/ч, первоначальное содержание СОЖ в стружке – 3%): 1 – температура дымовых газов в печи; 2 – результирующий радиационный поток на поверхность муфеля; 3 – конвективный поток на поверхность муфеля; 4 – результирующий радиационный поток на внутреннюю поверхность стенки печи; 5 – разность между температурой дымовых газов и максимальной температурой поверхности муфеля; а – СОЖ: 3 % – вода, 0 – масло; расход газа – 51,2 нм<sup>3</sup>/ч; б – СОЖ: 2,1 % – вода, 0,9% – масло, расход газа – 21,5 нм<sup>3</sup>/ч; в – СОЖ: 0 – вода, 3 % – масло, расход газа – 12,44 нм<sup>3</sup>/ч

Из рис. 6а, обобщающем данные моделирования для СОЖ I, состоящей только из воды, можно видеть, что оптимальной с этой точки зрения является печь высотой 4,5 м. Для печи такой высотой с целью сравнительного анализа было выполнено моделирование при производительности 1000 кг/ч. Оказалось, что в этом случае ожидаемо уменьшается перепад температуры стружки по сечению муфеля, поскольку стружка перемещается вдвое медленнее. Однако при этом расход газа на нагрев стружки уменьшается почти в 2,7 раза (с 51,2 нм<sup>3</sup>/ч при 2000 кг/ч до 19,1 нм<sup>3</sup>/ч при 1000 кг/ч). Это означает, что с точки зрения энергоэффектив-

ности работы печи более экономичной является работа двух установок производительностью 1000 кг/ч, чем одной производительностью 2000 кг/ч. Отметим, что сравнительно большие перепады температуры стружки на выходе из печи не являются недостатком технологии, поскольку в стружке приблизительно в равных пропорциях присутствуют как перегретые свыше 700 °С области (вблизи поверхности муфеля), так и недогретые до этой температуры области (в центре муфеля). Однако дисперсный характер стружки и ее последующее высыпание и перемешивание приводят к тому, что средняя температура стружки составляет именно заданные 700 °С.

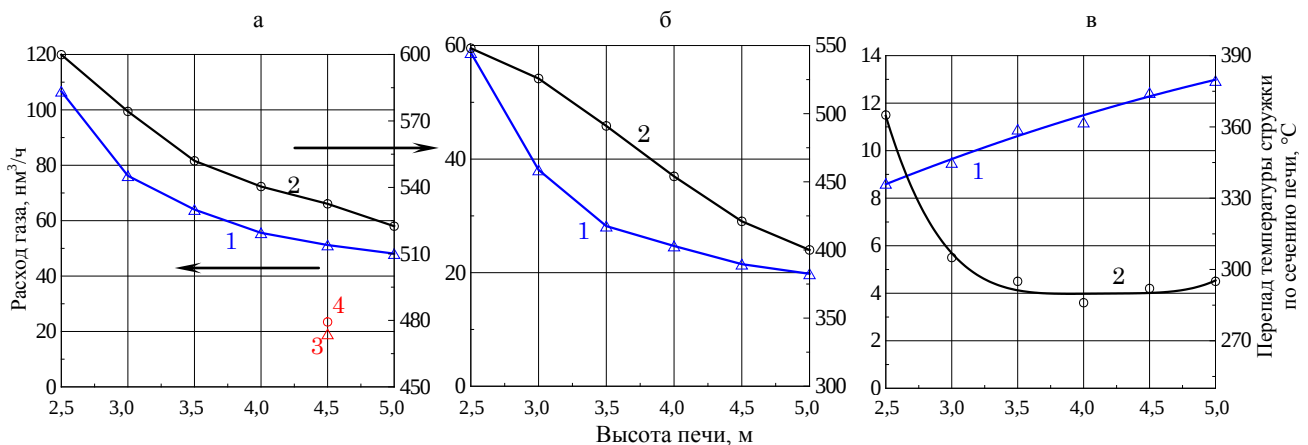


Рис. 6. Обобщение результатов моделирования для массового содержания СОЖ в стружке 3 %: 1, 3 – расход газа на нагрев стружки в зависимости от высоты печи; 2, 4 – максимальный перепад температуры стружки на выходе из муфельной печи (средняя температура стружки на выходе 700 °С); 1, 2 – для производительности печи 2000 кг/ч; 3, 4 – то же 1000 кг/ч; а – СОЖ: 3 % – вода, 0 – масло; б – СОЖ: 2,1 % – вода, 0,9 % – масло; в – СОЖ: 0 – вода, 3 % – масло

Для СОЖ II, содержащей 0,9 % масла, картина распределения температур и тепловых потоков изменяется только количественно, но не качественно. Благодаря сжиганию испарившегося масла расход газа, необходимого для прогрева стружки, уменьшается более чем в два раза, как можно видеть из рис. 6а и 6б. При этом количество сжигаемого масла ( $18 \text{ кг/ч} = 2000 \text{ кг/ч} \cdot 0,9 \%$ ) в тепловом эквиваленте заменяет приблизительно  $21\text{--}22 \text{ нм}^3/\text{ч}$  природного газа. При малых высотах печи ( $2,5\text{--}3,5 \text{ м}$ ) уменьшение расхода газа на  $30\text{--}50 \text{ нм}^3/\text{ч}$  для СОЖ, содержащей масло, заметно превосходит чистый эффект от сжигания дополнительного количества топлива (масла). Это объясняется тем фактом, что сжигание масла происходит почти по всей высоте печи, так что энергия от его сжигания равномерно распределяется по высоте печи. Это позволяет во всех точках рабочего пространства печи иметь высокую разность температуры муфеля и дымовых газов и соответственно повысить эффективность использования теплоты дымовых газов. Таким образом, можно сделать вывод о том, что использование стружки с СОЖ, содержащей небольшое количество масла, значительно улучшает энергоэффективность работы печи. Из рис. 6б видно, что высота печи  $4,5 \text{ м}$ , и в этом случае она является оптимальной с точки зрения как расхода газа на прогрев стружки, так и равномерности прогрева стружки. Дальнейшее увеличение высоты печи не приводит к заметному сокращению расхода газа.

Моделирование процесса нагрева стружки, содержащей СОЖ, состоящую только из масла (3 %), показало, что картины температур, тепловых потоков, а также зависимость расхода природного газа от высоты печи отличаются коренным образом от рассмотренных выше двух случаев. Для всех высот печи от  $2,5$  до  $5,0 \text{ м}$  масло испаряется и сгорает в полном объеме. Теплоты сгорания этого масла ( $60 \text{ кг/ч}$ , эквивалентно  $71,5 \text{ нм}^3/\text{ч}$  природного газа) практически достаточно для прогрева стружки до заданной температуры. Сжигание природного газа в данном случае необходимо лишь для испарения и последующего «зажигания» паров масла. Моделирование этого процесса показало, что на печах меньшей высоты испарить и зажечь масло легче, чем на более высоких пе-

чах. Так, для печи высотой  $2,5 \text{ м}$  необходимо всего  $8,6 \text{ нм}^3/\text{ч}$  природного газа, а для печи высотой  $5,0 \text{ м}$  – уже почти  $13 \text{ нм}^3/\text{ч}$  (рис. 6в). Однако различие в расходе природного газа менее чем в  $4 \text{ нм}^3/\text{ч}$  говорит о том, что при сжигании стружки, содержащей только масло, высота печи не является определяющим фактором с точки зрения энергоэффективности печи. При этом равномерность прогрева стружки лучше опять же на более высоких печах.

Подытоживая анализ результатов моделирования, следует сделать вывод о том, что оптимальной высотой печи с точки зрения энергоэффективности ее работы и равномерности прогрева стружки является высота  $4,5 \text{ м}$ .

В заключение остановимся на анализе результатов моделирования процесса испарения СОЖ в муфельной печи. На рис. 7–10 и в табл. 1 приведены результаты расчета характеристик зон испарения воды и масла для рассмотренных составов СОЖ и высот печей. Испарение воды для всех высот печи начинается практически сразу после попадания стружки в печь. Только для печей высотой  $4\text{--}5 \text{ м}$  стружка проходит  $15\text{--}30 \text{ см}$  до того, как начинается процесс испарения воды. Высота зоны полного испарения воды растет от значения  $2,0 \text{ м}$  в печи высотой  $2,5 \text{ м}$  до почти  $3,7 \text{ м}$  в печи высотой  $5,0 \text{ м}$ . Это связано с более интенсивным нагревом стружки в печи меньшей высоты. Высота зоны испарения воды при прогреве стружки, содержащей СОЖ из воды и масла, меньше на  $10\text{--}30 \%$  по сравнению со случаем, когда СОЖ состоит только из воды. Такая разница связана не только с уменьшением абсолютного содержания воды, но и с более равномерным прогревом стружки при сжигании паров масла.

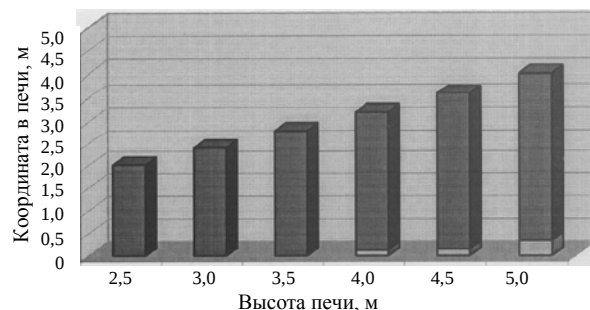


Рис. 7. Параметры зоны испарения воды в СОЖ, состоящей из 3 % воды и 0 масла в зависимости от высоты печи (координата верхней точки зоны начала испарения воды, отсчитываемая от верха печи, и высота зоны испарения воды): ■ – высота зоны испарения; □ – координата верхней точки зоны испарения

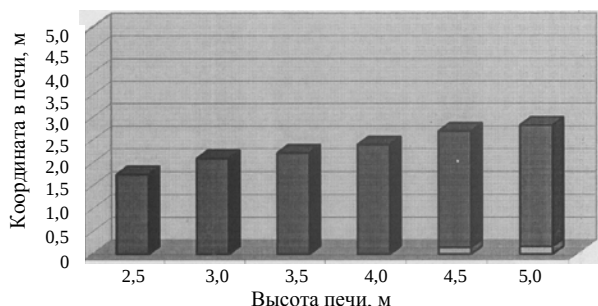


Рис. 8. Параметры зоны испарения воды в СОЖ, состоящей из 2,1 % воды и 0,9 % масла в зависимости от высоты печи (координата верхней точки зоны начала испарения воды, отсчитываемая от верха печи, и высота зоны испарения воды): ■ – высота зоны испарения; □ – координата верхней точки зоны испарения

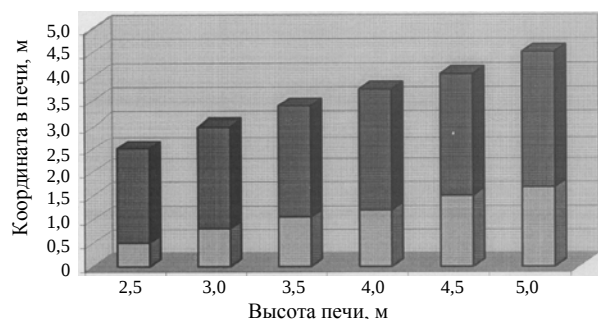


Рис. 9. Параметры зоны испарения масла в СОЖ, состоящей из 2,1 % воды и 0,9 % масла в зависимости от высоты печи (координата верхней точки зоны начала испарения масла, отсчитываемая от верха печи, и высота зоны испарения масла): ■ – высота зоны испарения; □ – координата верхней точки зоны испарения

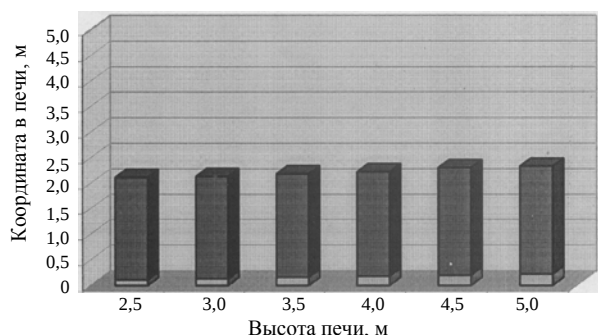


Рис. 10. Параметры зоны испарения масла в СОЖ, состоящей из 0 воды и 3 % масла в зависимости от высоты печи (координата верхней точки зоны начала испарения масла, отсчитываемая от верха печи, и высота зоны испарения масла): ■ – высота зоны испарения; □ – координата верхней точки зоны испарения

Для испарения масла соответствующие характеристики отличаются только количественно. Масло начинает испаряться на расстоянии от 0,1 до 1,7 м от входа в муфель.

Таблица 1

Параметры зон испарения воды и масла для различных составов СОЖ и высот печи

| Высота печи, м | СОЖ I<br>(3 % воды, 0 масла) |                  |       |                  | СОЖ II<br>(2,1 % воды, 0,9 % масла) |                  |       |                  | СОЖ III<br>(0 воды, 3 % масла) |                  |       |                  |
|----------------|------------------------------|------------------|-------|------------------|-------------------------------------|------------------|-------|------------------|--------------------------------|------------------|-------|------------------|
|                | Вода                         |                  | Масло |                  | Вода                                |                  | Масло |                  | Вода                           |                  | Масло |                  |
|                | $H_1$                        | $L_{\text{вар}}$ | $H_1$ | $L_{\text{вар}}$ | $H_1$                               | $L_{\text{вар}}$ | $H_1$ | $L_{\text{вар}}$ | $H_1$                          | $L_{\text{вар}}$ | $H_1$ | $L_{\text{вар}}$ |
| 2,5            | 0                            | 2,00             | –     | –                | 0                                   | 1,67             | 0,50  | 2,00             | –                              | –                | 0,11  | 2,00             |
| 3,0            | 0                            | 2,40             | –     | –                | 0                                   | 2,10             | 0,80  | 2,20             | –                              | –                | 0,13  | 2,00             |
| 3,5            | 0                            | 2,80             | –     | –                | 0                                   | 2,22             | 1,05  | 2,33             | –                              | –                | 0,16  | 2,02             |
| 4,0            | 0,13                         | 3,07             | –     | –                | 0                                   | 2,40             | 1,20  | 2,53             | –                              | –                | 0,18  | 2,04             |
| 4,5            | 0,15                         | 3,45             | –     | –                | 0,15                                | 2,55             | 1,50  | 2,55             | –                              | –                | 0,20  | 2,10             |
| 5,0            | 0,33                         | 3,67             | –     | –                | 0,17                                | 2,66             | 1,67  | 2,83             | –                              | –                | 0,22  | 2,11             |

**Примечание.**  $H_1$  – координата верхней точки зоны начала испарения, отсчитываемая от верха печи;  $L_{\text{вар}}$  – высота зоны испарения.

Более позднее начало испарения масла обусловлено более высокой температурой его кипения (~400 °С). Координата зоны начала испарения масла сдвигается внутрь печи по мере увеличения ее высоты. Размер зоны полного испарения масла имеет меньший разброс, чем для случая испарения воды, и заключен в диапазоне 2,0–2,8 м. Размер данной зоны увеличивается с ростом высоты печи для СОЖ, состоящей из воды и масла, и остается практически неизменным для СОЖ, состоящей только из масла (табл. 1).

## ВЫВОД

Сопоставление расчетных данных с результатами натурных экспериментов на работающей установке показало, что предложенная и решенная математическая модель непрерывного нагрева стружки в проходной муфельной печи дает качественно правильную картину процесса и удовлетворительную для практики точность расчетов.

## ЛИТЕРАТУРА

- Дьяконов, О. М. Исследование процесса нагрева металлической стружки. Часть 1 / О. М. Дьяконов // Вестник БНТУ. – 2007. – № 6. – С. 42–49.
- Дьяконов, О. М. Исследование процесса нагрева металлической стружки. Часть 2 / О. М. Дьяконов // Вестник БНТУ. – 2008. – № 1. – С. 23–34.

Поступила 5.05.2007