

# ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

DOI: 10.12737/23534

*Кузнецов В.А., д-р техн. наук, проф.**Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова*

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОБЖИГЕ КЕРАМЗИТА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

**kouz@intbel.ru**

*Разработана математическая модель и составлена компьютерная моделирующая программа, с помощью которой выполнено численное исследование горения природного газа и теплообмена при обжиге керамзита во вращающейся печи. Рассмотрен режим тепловой работы печи, при котором достигаются наилучшие условия теплоотдачи диффузионного факела и вспучивания обжигаемых гранул.*

**Ключевые слова:** численное моделирование, диффузионный факел, радиационно-конвективный теплообмен, обжиг керамзита.

Керамзитовый гравий получают обжигом легкоплавкой глины при температуре ниже 1200 °С. Снижение плотности керамзита, улучшающее его теплоизоляционные свойства, достигается созданием в конце процесса обжига "теплового удара", который приводит поверхностные слои гранул в пластичное состояние при одновременном интенсивном расширении внутри них газообразующих органических примесей или нефтяных отходов.

Во вращающихся печах, где сырьевые гранулы обжигаются в объеме слоя, практически не ограниченного стенками, результаты процесса их вспучивания и, следовательно, качество керамзита непосредственно зависят от условий горения топлива. Чтобы получать керамзитовый гравий с более низкой плотностью, необходимо обеспечивать в зоне вспучивания максимально возможный поток излучения топливного факела на слой обжигаемых гранул.

В настоящее время в качестве топлива во вращающихся печах чаще всего используют природный газ. Так как форма, длина и положение факела горящего топлива скрыты футерованным вращающимся корпусом печи, а теоретический расчет оптимальных теплотехнических условий вспучивания в ней гранул затруднен, то горелочные устройства для обжига керамзита специально не разрабатывают, применяя, как правило, горелки, первоначально предназначенные для других технологических целей [1]. При этом воздух подается на горение непосредственно через каналы горелки, а теплота, уносимая из печи обожженным керамзитом, не используется для его нагрева.

Известно, что длина диффузионного факела, который образуется при раздельной подаче в печь природного газа и воздуха, изменяется приблизительно пропорционально диаметру сопла горелки и уменьшается с увеличением скорости вылета из него топлива. Обычно различают два вида диффузионных факелов – короткий "жесткий" факел, образующийся при высокой (свыше 300 м/с) скорости вылета природного газа, и длинный "вялый" факел, образующийся при пониженной скорости вылета топлива. Численное моделирование [2] показало, что основной фактор, вызывающий их различие, это воздействие выталкивающей силы на неизотермический поток газов. "Вялый" факел поднимается вверх под воздействием выталкивающей силы и стелется по футеровке печи, создавая недожог топлива из-за плохого смешения его с воздухом. В коротком "жестком" факеле все топливо сгорает в рабочем пространстве печи, не соприкасаясь с ее стенами. Так как тепловыделение в жестком факеле сосредоточено на небольшом участке по длине печи, есть основания полагать, что короткий жесткий факел более пригоден для создания "теплового удара" при обжиге гранул керамзита.

Исследовать тепловую работу вращающейся печи возможно с помощью математического моделирования взаимосвязанных процессов горения топлива и радиационно-конвективного теплообмена при турбулентном движении воздуха и газообразных продуктов горения. Специально разработанная математическая модель и моделирующая компьютерная программа позволили поставить численные эксперименты с це-

люю поиска эффективных эксплуатационных условий обжига керамзита [3].

Математическая формулировка поставленной задачи выполнялась с помощью дифференциальных уравнений в частных производных, записанных в цилиндрической системе координат  $x$ ,  $r$ ,  $\varphi$ . Для каждого дифференциального уравнения формулировались граничные условия. Кроме того, в процессе численного эксперимента приходилось рассчитывать и уточнять физические свойства газообразной среды и тех-

нологического материала, изменяющиеся в процессе нагрева, обжига и вспучивания гранул.

Трехмерная математическая модель учитывала наличие слоя обжигаемого материала, скользящего по футеровке и заполняющего собой часть поперечного сечения печи, по форме приближающуюся к сегменту. Стационарное горение природного газа в диффузионном факеле, в котором скорость химических реакций многократно превышает интенсивность диффузионного и турбулентного смешения топлива и воздуха, моделировалось дифференциальными уравнениями переноса компонентов горения:

$$\frac{\partial \rho u c_T}{\partial x} + \frac{\partial r v c_T}{r \partial r} + \frac{\partial \rho w c_T}{r \partial \varphi} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_{эф} \frac{\partial c_T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho D_{эф} \frac{\partial c_T}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \rho D_{эф} \frac{\partial c_T}{r \partial \varphi} \right) = -M_T,$$

$$\frac{\partial \rho u c_B}{\partial x} + \frac{\partial r v c_B}{r \partial r} + \frac{\partial \rho w c_B}{r \partial \varphi} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_{эф} \frac{\partial c_B}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho D_{эф} \frac{\partial c_B}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \rho D_{эф} \frac{\partial c_B}{r \partial \varphi} \right) = -M_B,$$

где  $c_T$ ,  $c_B$  – массовые концентрации соответственно топлива и воздуха, кг/кг газов;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – продольная, радиальная и окружная компоненты скорости, м/с;  $\rho$  – плотность газов, кг/м<sup>3</sup>;  $D_{эф}$  – эффективный коэффициент диффузии, учитывающий молекулярный и турбулентный перенос, м<sup>2</sup>/с;  $M_T$ ,  $M_B$  – массы соответственно топли-

ва и воздуха, вступивших в реакции горения, кг/(м<sup>3</sup>с).

Чтобы исключить из правой части этих уравнений величины, неизвестные при диффузионном горении, в математической модели применено дифференциальное уравнение для расчетной концентрации  $C$  [4]:

$$\frac{\partial \rho u C}{\partial x} + \frac{\partial r v C}{r \partial r} + \frac{\partial \rho w C}{r \partial \varphi} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_{эф} \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho D_{эф} \frac{\partial C}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \rho D_{эф} \frac{\partial C}{r \partial \varphi} \right) = 0,$$

$$C = c_T - c_B / n_B,$$

где  $n_B$  – стехиометрическое массовое соотношение топлива и воздуха в реакциях горения.

По результатам численного решения дифференциального уравнения для расчетной концентрации  $C$  находились концентрации топлива  $c_T$  и воздуха  $c_B$ , после чего, с помощью первого из приведенных выше дифференциальных уравнений, определялось распределение вдоль фронта пламени массы сгоревшего топлива  $M_T$ , которая применялась затем для расчета тепловыделения в диффузионном факеле. Математическая модель обжига керамзита содержала также дифференциальное уравнение, позволяющее учитывать изменение концентрации водяного пара в смеси газов при испарении влаги из поступающих в печь сырьевых гранул. Граничные условия к дифференциальным уравнениям переноса количества вещества формулировались с учетом непроницаемости стен печи для газообразных компонентов горения.

Четыре дифференциальных уравнения моделировали поля компонентов скорости и давления упрощенным методом, подробно изложенным в [5]. При этом турбулентная вязкость и параметры турбулентного переноса определя-

лись двумя дифференциальными уравнениями стандартной диссипативной модели турбулентности [6]. Наконец, результаты переноса излучения в селективной газообразной среде и температурные поля при радиационно-конвективном теплообмене находились усовершенствованным методом численного решения трех дифференциальных уравнений [5].

Граничные условия к дифференциальным уравнениям теплообмена задавались, исходя из баланса потоков теплоты, подводимой к стенкам печи и отводимой через них в окружающую среду. При расчете температуры внутренней горячей поверхности стен определялись тепловые потоки к ним от газов конвекцией и излучением. Учитывалось также прямое переизлучение футеровки на обжигаемый материал и температурные скачки, возникающие в ней при периодическом поступлении вращающихся стен под слой керамзита.

В качестве объекта численного моделирования выбрана вращающаяся печь длиной 40 м с диаметром корпуса 2,5 м при толщине шамотной футеровки 230 мм и угле наклона продольной оси печи к горизонту 3,5°. Производитель-

ность по керамзиту задана равной 7 т/ч при расходе природного газа 800 м<sup>3</sup>/ч с теплотой сгорания 34800 кДж/м<sup>3</sup>. Воздух, нагретый до 320 °С, подавался по всему свободному поперечному сечению печи при коэффициенте избытка 1,1. Влажность глиняных гранул, поступающих в печь, принята равной 11 %.

Для численного решения на персональном компьютере системы из двенадцати дифференциальных уравнений в более чем 200 тысячах узлов сетки методом полинейной прогонки потребовалось выполнить до 20 тысяч итераций, что обеспечило высокую точность вычисления параметров газообразной среды по всему объему печи. Температура обжигаемого керамзита определялась без учета неравномерности прогрева гранул. Теплоемкость материала гранул  $c_{\text{мат}}$  вычислялась в зависимости от средней температуры слоя керамзита  $t$ , °С:

$$c_{\text{мат}} = 735 + 0,5t - 0,000074t^2.$$

Результаты численных экспериментов представлены в памяти компьютера в виде таб-

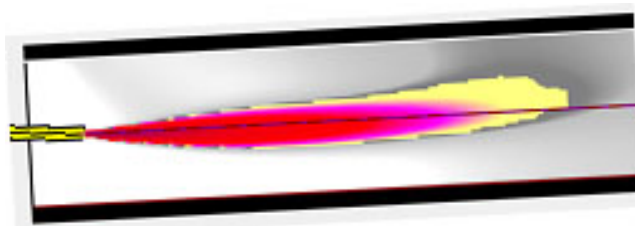


Рис. 1. Диффузионный факел в обжиговой печи при скорости вылета топлива 434 м/с и угле наклона горелки 3,5°

Чтобы создать короткий "жесткий" факел, в математической модели предусматривалась подача природного газа с высокой скоростью 434 м/с через четыре сопла, занимающих часть окружности кольцевой щели, внутренний и наружный диаметры которой равнялись соответственно 100 и 107,2 мм. Выходное сопло горелки располагалось на расстоянии 800 мм от обреза печи. Угол наклона горелки мало сказывается на теплоотдаче "жесткого" факела, поэтому в данном случае выбран простейший вариант – горизонтальное положение горелки, при котором угол ее наклона к продольной оси печи составляет 3,5°. Как показывает изображение факела на рис. 1, топливо сгорает полностью на участке печи длиной 7,3 м.

На рис. 2 представлены расчетные распределения средней температуры слоя обжигаемых гранул и средней температуры газообразной среды по длине вращающейся печи, соответствующие диффузионному факелу, изображенному на рис. 1.

лиц, содержащих значения физических величин в каждом узле сетки. Это, прежде всего, компоненты скорости, давление и температура газообразной среды, параметры турбулентности, тепловые и радиационные потоки, состав, плотность и теплоемкость газов. Анализ численных результатов позволяет детально исследовать процессы движения газов, горения и теплообмена, составляющие в совокупности тепловую работу обжиговой печи.

Компьютерная палитра цветовых оттенков, соотнесенная с вычисленными значениями температуры и концентрации топлива, помогает наглядно изобразить диффузионный факел горящего природного газа на экране монитора. Установка курсора компьютерной "мыши" на любой точке расчетной области приводит к появлению на экране локальных значений концентрации топлива и воздуха, скорости газов, температуры газообразной среды и слоя керамзита. Представление о форме и размерах диффузионного факела в обжиговой печи дает его графическое изображение на рис. 1.

Согласно кривой 1, после поступления влажных гранул в печь происходит их сушка при температуре 100 °С на участке длиной 9 м. Затем осуществляется нагрев слоя до максимальной температуры, в области которой поверхностные слои гранул переходят в пластичное состояние и осуществляется вспучивание керамзита. Наконец, в горячем конце печи на участке длиной 5 м происходит охлаждение керамзита до температуры ниже 800 °С воздухом, подаваемым в печь.

Кривая 2 показывает распределение по длине печи средней температуры газов, достигающей 1600 °С при заданном избытке воздуха. Максимальная расчетная температура горения в отдельных узлах сетки составляет при этом 1900...2000 °С. Расчетная температура газов на выходе из вращающейся печи 488 °С хорошо согласуется с ее эксплуатационными значениями, что подтверждает корректность примененного метода численного моделирования радиационного переноса теплоты в селективной газовой среде.

Как известно, локальная величина давления уменьшается с повышением скорости потока газов. Математическое моделирование показало, что топливная струя создает в печи столь высо-

кое разрежение, так что давление в горячей части печи оказывается заметно ниже, чем на выходе из нее газов. Рис. 3 представляет разность этих давлений вблизи стен обжиговой печи.

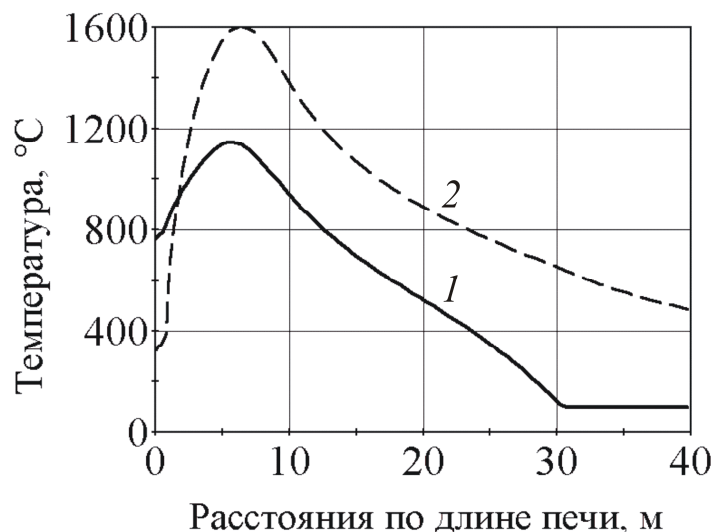


Рис. 2. Расчетная средняя температура слоя обжигаемых гранул (1) и газов (2) в поперечных сечениях обжиговой печи при горении природного газа в коротком "жестком" факеле

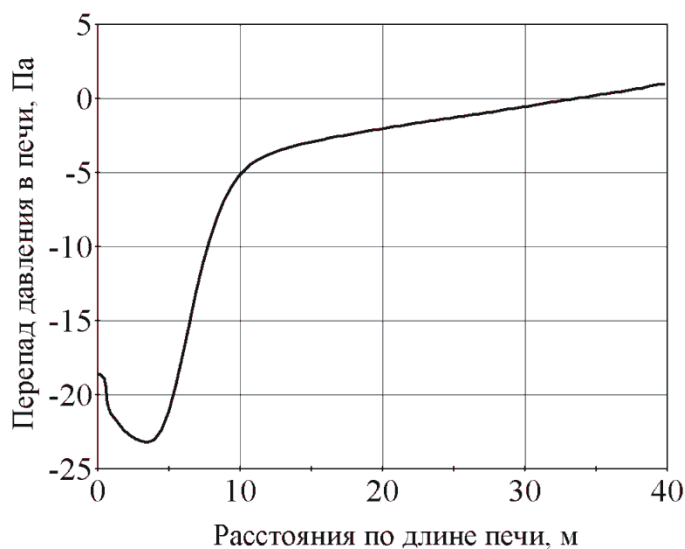


Рис. 3. Разность давлений в расчетном поперечном сечении и на выходе из печи

Кривая на рисунке показывает резкое понижение давления в области диффузионного горения, что позволяет сделать вывод, что основной присос в печь холодного атмосферного воздуха происходит на ее горячем конце в тех случаях, когда воздух подается на горение непосредственно через каналы горелки. Представляется более разумным употребить разрежение, создаваемое горелкой, на преодоление сопротивления шахтного холодильника керамзита при подаче горячего воздуха в печь по всему ее свободному поперечному сечению, имея в виду, что любой неконтролируемый присос холодного воздуха в горячей части печи неизбежно приве-

дет к увеличению удельного расхода топлива на производство керамзита.

Таким образом, можно полагать, что изученные численно процессы диффузионного горения природного газа и радиационно-конвективного теплообмена соответствуют оптимальному режиму обжига керамзита, при котором расход топлива во вращающейся печи близок к минимальному. Для реализации параметров оптимальной тепловой работы вращающейся печи необходимо осуществлять подогрев подаваемого на горение воздуха за счет охлаждения им готового керамзитового гравия, приводить к минимуму неконтролируемые присосы

атмосферного холодного воздуха в горячей части печи и применять горелочные устройства с высокой скоростью вылета природного газа, обеспечивающей формирование в печи короткого высокотемпературного факела.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пышкин А.С., Милушкин А.К. Применение автоматизированных горелок для обжига керамзитового гравия во вращающихся печах // Промышленная энергетика. 2012. № 11. С. 18–20.

2. Кузнецов В.А., Рязанцев О.А., Трулев А.В. Численное моделирование горения и теплообмена в цементной вращающейся печи //

Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 4. С. 161–164.

3. Або Альзахаб О. Численное исследование теплообмена при обжиге керамзита во вращающейся печи // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых. Белгород, 2016. С. 1–5.

4. Сполдинг Д.Б. Основы теории горения. М.: Госэнергоиздат, 1959.

5. Kuznetsov V. Mathematic Simulating Processes in High-Temperature Plants. Saarbrücken: Scholars' Press, 2015.

6. Пейтел В.К., Роди В., Шойерер Г. Модели турбулентности для течений в пристеночной области с малыми числами Рейнольдса // Аэрокосмическая техника. 1986. № 2. С. 184–197.

---

**Kuznetsov V.A.**

#### NUMERICAL RESEARCHING THE COMBUSTION AND HEAT TRANSFER WHILE HAYDITE BURNING IN A ROTARY KILN

*A mathematical model has been elaborated and a computer simulating program has been made up with the help of which a numerical researches were fulfilled for natural-gas combustion and the heat transfer in a rotary kiln while haydite burning. Its thermal operation was considered to find the best conditions of heat transfer from the diffusion flame to expanding calcined granules.*

**Key words:** *numerical simulating, diffusion flame, heat transfer by radiation and convection, haydite burning.*

---

**Кузнецов Валерий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры энергетика теплотехнологии. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46  
E-mail: kouzn@intbel.ru