

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГОРЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТОПКЕ

kouzn@intbel.ru

С помощью компьютерной программы математического моделирования исследовано влияние закрутки вторичного воздуха на длину и форму диффузионного факела при разной скорости вылета природного газа из сопла горелки в вертикальной цилиндрической топке водонагревателя. Подтверждена адекватность математической модели. Установлены новые количественные закономерности.

**Ключевые слова:** природный газ, горение, факел, вертикальная топка, крутка воздуха, выталкивающая сила, математическая модель, вычислительный эксперимент

### Постановка задачи

В большинстве случаев горение природного газа в промышленных топках осуществляют в диффузионном факеле, длина и форма которого зависят в основном от интенсивности турбулентной диффузии топлива и окислителя, а не от скорости химических реакций. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что при горизонтальном положении горелки и постоянном расходе природного газа длина прямооточного диффузионного факела оказывается прямо пропорциональной диаметру сопла горелки [1]. Коэффициент пропорциональности близок к 200, но может несколько изменяться в зависимости от состава сжигаемого топлива и средней температуры газообразной среды в факеле.

Таким образом, диффузионному горению свойственно образование длинного факела, в то время как для эффективного теплообмена в водоохлаждаемых топках требуется интенсивное сжигание топлива в коротком факеле при хорошем заполнении объема топки высокотемпературными продуктами горения. Короткий диффузионный факел получают путем закрутки потока воздуха, подаваемого на горение. Из-за повышенной сложности турбулентного теплопереноса в высокотемпературных газах закономерности диффузионного горения газообразного топлива в закрученном факеле оказываются теоретически трудно предсказуемыми и недостаточно изученными экспериментально.

Особый интерес вызывает исследование воздействия на факел подъемной выталкивающей силы, создаваемой силой тяжести в неодно-

родной или неизотермической среде. Воздействии выталкивающей силы на вертикальный факел учитывается с помощью числа подобия Фруда  $Fr = u^2/dg$ , где  $u$  – скорость вылета топлива из сопла горелки,  $d$  – диаметр сопла,  $g$  – ускорение свободного падения. Согласно [2], при постоянном расходе природного газа отношение длины факела, направленного вниз, к диаметру сопла приблизительно пропорционально числу Фруда в степени 0,2.

### Математическая модель

Современные вычислительные методы позволяют изучать горение природного газа с помощью компьютерных программ математического моделирования процессов теплопереноса при турбулентном движении газообразной среды. Тепловая работа топки зависит от большого числа физико-химических, газодинамических и теплообменных процессов, взаимно связанных между собой, так что при эксплуатации топки невозможно обособленно воздействовать на какой-либо один процесс или параметр, не затрагивая всю систему в целом. Поэтому в математической модели необходимо адекватно описывать всю совокупность взаимодействующих факторов, влияющих на горение, – процессы турбулентного движения топлива, воздуха и продуктов горения, их смешение в диффузионном факеле, радиационно-конвективный теплообмен.

Математическая модель движения газообразной среды включает в себя уравнение неразрывности потока, с помощью которого вычисляют поле давления, и три уравнения Навье–Стокса, определяющие компоненты скорости  $u$ ,

$v$ ,  $w$  вдоль соответствующих осей координат. Введение турбулентного аналога коэффициента вязкости в дифференциальные уравнения позволило применить их для моделирования турбулентных течений. Турбулентный коэффициент вязкости  $\mu_t$  в математической модели вычислялся с помощью двухпараметрической диссипативной модели турбулентности, содержащей дифференциальные уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации турбулентной энергии.

Теплообмен в высокотемпературных газах называют сложным, так как в нем одновременно участвуют все три способа переноса энергии – теплопроводность, конвекция и излучение. Математическое моделирование сложного теплообмена в топке выполнено с помощью дифференциального уравнения радиационно-

$$\frac{\partial \rho u C}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho v C}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial C}{\partial r} \right) = 0.$$

Здесь  $\rho$  – плотность,  $u$ ,  $v$ ,  $w$  – компоненты скорости,  $\mu_t$  – турбулентный аналог динамического коэффициента вязкости,  $Pr_t$  – турбулентное число Прандтля. Учитывая форму рабочего пространства, наиболее подходящей для цилиндрической топки является цилиндрическая система координат  $(x, r, \varphi)$ . Ось  $x$  направлена по длине топки, ось  $r$  – по ее радиусу и координата  $\varphi$  – по окружности топки.

Граничные условия к этому уравнению формулировались, исходя из непроницаемости водоохлаждаемых стен топки для химических компонентов. Предполагалось, что природный газ воспламеняется при контакте с воздухом непосредственно за топливным соплом и при дальнейшем его горении в объеме топки химические реакции сосредотачиваются в тонком слое газообразной среды, образующем фронт пламени.

При компьютерном моделировании дифференциальные уравнения заменяются дискретными алгебраическими аналогами, определяющими значения искомых функций в узлах расчетной

$$M_T = \frac{\partial \rho u c_T}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho v c_T}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_{эф} \frac{\partial c_T}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \rho D_{эф} \frac{\partial c_T}{\partial r} \right).$$

Очевидно, что распределение тепловыделения по объему топки пропорционально массе топлива, сгоревшего в каждом контрольном объеме за единицу времени. Оно учитывается при вычислении температурного поля в топке.

Решая системы сеточных дискретных уравнений, можно получить значения неизвестных параметров (компонент скорости, давления, температуры, концентраций и т. д.) в каждом расчетном узле сетки. Все вычисления выполняются на

конвективного переноса теплоты, учитывавшего перенос скрытой теплоты диссоциации трехатомных газов, и уточненных дифференциальных уравнений радиационного переноса энергии в ограниченном объеме поглощающей среды [1].

При математическом моделировании диффузионного факела предполагалось, что скорость химических реакций настолько высока, что не влияет на интенсивность горения. В этом случае с помощью концентраций топлива  $c_T$ , воздуха  $c_B$  и стехиометрического массового соотношения  $n_B$  определяется понятие расчетной концентрации,

$$C \equiv c_T - c_B / n_B,$$

и для нее составляется дифференциальное уравнение переноса в двумерной постановке задачи:

сетки. При переходе к дискретным аналогам контрольные объемы для компонент скорости смещают на полшага соответственно вдоль осей  $x$ ,  $r$  или  $\varphi$  относительно контрольных объемов для давления и других скалярных функций. Такое построение разнесенной, или шахматной, сетки обеспечивает расположение узлов для расчета давления на гранях контрольных объемов, предназначенных для компонент скорости.

Хотя численное решение системы дискретных аналогов выполнялось эффективным методом прогонки, для уточнения искомых величин, входящих в переменные коэффициенты расчетных уравнений, потребовалось значительное число итераций. В каждой итерации по расчетной концентрации  $C$  определялось распределение концентраций топлива  $c_T$  и окислителя  $c_{ок}$  в диффузионном факеле, а затем вычислялась масса сгоревшего топлива  $-M_T$ , приходящаяся на единицу объема и единицу времени, по дискретному аналогу дифференциального уравнения

персональном компьютере в процессе нескольких тысяч итераций. Компьютерная программа, разработанная по математической модели, позволила поставить серию вычислительных экспериментов для изучения условий горения и теплообмена в объеме топки, практически недоступном для измерений.

Результаты вычислительных экспериментов

Численно исследовалось горение природного газа в вертикальной водоохлаждаемой топке водонагревателя [3] как в прямоточном, так и закрученном факеле при расходе топлива  $24 \text{ м}^3/\text{ч}$  и коэффициенте избытка воздуха 1,1.

Над цилиндрической частью топки диаметром 510 мм установлен переходный конус, к которому сверху присоединено горелочное устройство, включающее в себя два коаксиальных канала. Центральный канал диаметром 140 мм служит для подачи первичного воздуха (10 % от общего объема). Вторичный воздух проходит со скоростью 14,8 м/с по кольцевому каналу, на выходе из которого установлен лопаточный завихритель, создающий крутку потока. Природный газ подается из сопла горелки по оси центрального канала, вовлекает первичный воздух в струйное течение, воспламеняется и смешивается с вторичным воздухом, образуя диффузионный факел. Диаметр сопел горелки лежит в диапазоне от 5 до 26 мм. Скорость вылета природного газа зависит от диаметра сопла и при его увеличении снижается более, чем на порядок – от 340 до 12,6 м/с.

При численном решении задачи топка разбивалась на контрольные объемы неравномерной расчетной сеткой таким образом, что по длине топки выделялось до 190 расчетных слоев, а по радиусу до 60.

Рассматривались как прямоточный, так и закрученный факел. Как показывают результаты вычислительных экспериментов на рис. 1, при высокой скорости вылета топлива длина вертикального прямоточного факела возрастает с увеличением диаметра сопла и соответствующем уменьшением скорости, но в заметно в меньшей степени, чем длина горизонтального факела в таких же условиях.

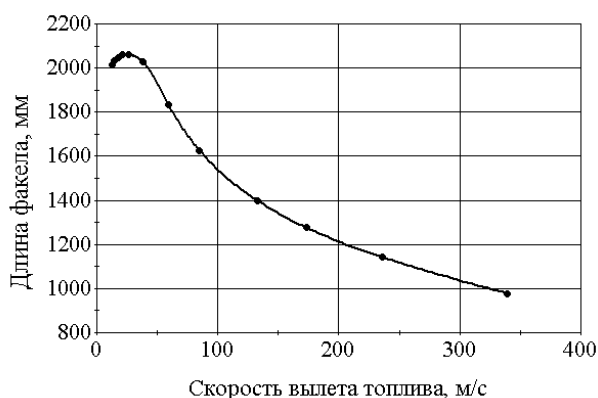


Рис. 1. Зависимость длины вертикального прямоточного факела от скорости вылета природного газа из сопла горелки

Более того, при скорости вылета природного газа ниже 25 м/с длина факела, направленно-

го вниз, перестает возрастать и даже несколько уменьшается, что объясняется действием выталкивающей силы в неизотермической среде.

Эти же результаты представлены на рис. 2 в виде безразмерной зависимости отношения длины факела к диаметру сопла от числа Фруда. Оказалось, что на кривой рис. 2 можно выделить два участка. Первый участок при низких значениях числа Фруда ( $Fr < 10000$ ) описывается уравнением

$$l'_\phi = 21,9 Fr^{0,198},$$

показатель степени в котором близок к опубликованному значению. Отсюда можно сделать вывод о достаточно хорошем соответствии результатов вычислений экспериментальным данным [2], что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели.

Второй участок кривой при высоких значениях числа Фруда ( $Fr > 30000$ ) описывается уравнением с меньшим показателем степени;

$$l'_\phi = 79,8 Fr^{0,0635}$$

Он создает плавный переход от первого участка кривой с заметным влиянием числа Фруда к области, в которой влияние подъемной силы практически не проявляется. Наличие такого перехода к теоретически предсказуемому режиму горения, характерному для горизонтального факела, также свидетельствует об адекватности математической модели.

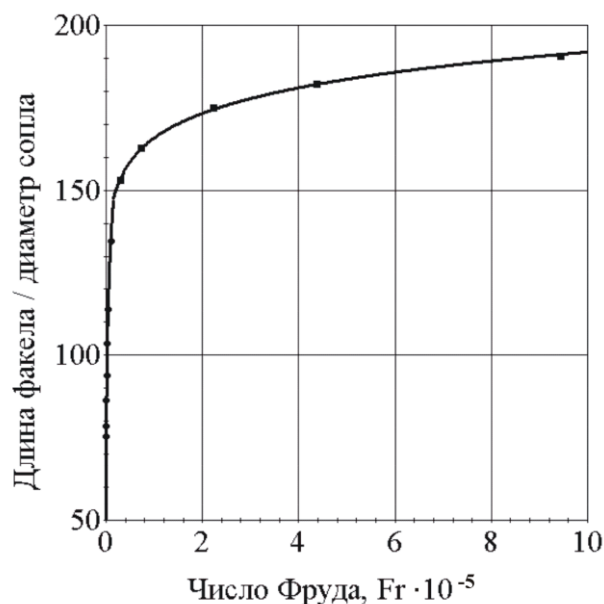


Рис. 2. Безразмерная зависимость отношения длины вертикального прямоточного факела к диаметру сопла от числа Фруда

Чтобы оценить влияние крутки вторичного воздуха на длину и форму вертикального диффузионного факела, выполнена серия вычислительных экспериментов для разных диаметров

сопла горелки и, следовательно, разной скорости вылета топлива при углах наклона направляющих лопаток, создающих крутку вторичного воздуха, от  $10^\circ$  до  $45^\circ$ .

Результаты численных исследований представлены на рис. 3 в виде графической зависимости отношения длин закрученного и прямого факела  $l''_{\phi}/l'_{\phi}$  от относительной крутки, вычисленной по соотношению массовых скоростей – окружной скорости крутки воздуха  $(\rho w)_{\text{в}}$  и вертикальной скорости вылета топлива  $(\rho u)_{\text{т}}$  из сопла горелки, при различных углах наклона направляющих лопаток.

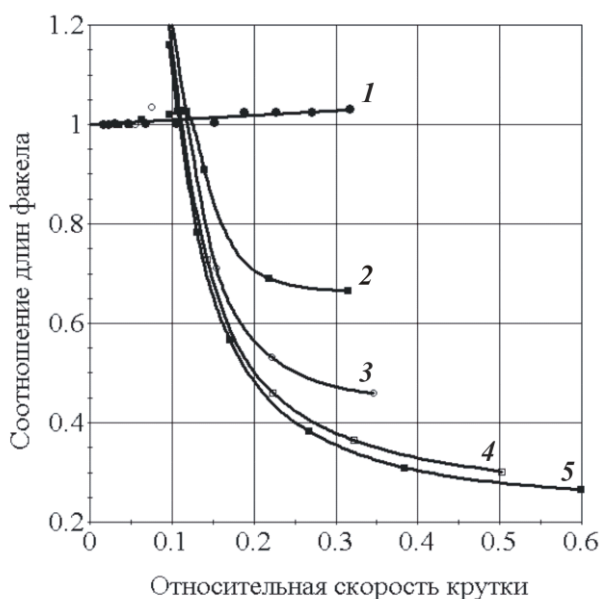


Рис. 3. Безразмерная зависимость отношения длин закрученного  $l''_{\phi}$  и прямого  $l'_{\phi}$  факела от относительной крутки воздуха при углах наклона лопаток:

1 –  $10^\circ$ , 2 –  $20^\circ$ , 3 –  $30^\circ$ , 4 –  $40^\circ$ , 5 –  $45^\circ$

Оказалось, что при угле наклона лопаток  $10^\circ$  длина факела мало зависит от степени крутки. В этом случае при возрастании относительной крутки факел не только не укорачивается, а даже немного удлиняется (примерно до 2%), как показывает кривая 1 на рис. 3. Та же зависимость сохраняется и при других углах наклона лопаток в области малых значений относительной крутки (при  $(\rho w)_{\text{в}}/(\rho u)_{\text{т}} < 0,1$ ). Более того, при соотношении массовых скоростей  $(\rho w)_{\text{в}}/(\rho u)_{\text{т}} \approx 0,1$  проявляется тенденция к резкому возрастанию длины закрученного факела (примерно до 20%) с последующим переходом к укорочению факела при дальнейшем повышении относительной крутки (см. кривые 3, 4 и 5 на рис. 3).

Интересно проследить за изменением формы диффузионного закрученного факела. Результаты численного моделирования представлены не только в табличном, но и в графическом

виде. Цветное графическое изображение на экране компьютера сопровождается показом палитры цветов, каждый из которых определяет уровень концентрации топлива. Таким способом наглядно изображен процесс горения природного газа в вертикальной топке.

На рис. 4 показаны два факела, образовавшиеся при истечении природного газа из сопла диаметром 8 мм, первый из которых (рис. 4а) прямооточный, а второй (рис. 4б) закручен под углом  $30^\circ$  при относительной скорости крутки  $(\rho w)_{\text{в}}/(\rho u)_{\text{т}} \approx 0,1$ . Прямоточный факел сконцентрирован в узкой области вдоль оси топки, в то время как закрученный факел заметно расширен относительно оси топки и удлинен.

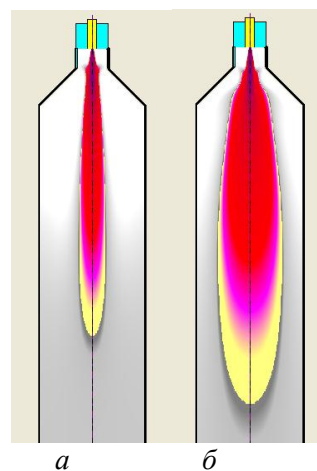


Рисунок 4. Форма факела при вылете природного газа из сопла диаметром 8 мм:  
а – прямооточный факел, б – факел закручен под углом  $30^\circ$

В то же время кривые 2 – 5 на рис. 3 показывают, что в области изменения относительной скорости крутки от 0,1 до 0,2 происходит резкое уменьшение длины диффузионного факела, а в приосевой области топки под факелом возникает возвратное движение газов, создающее циклонный эффект. Так как возрастание относительной крутки в вычислительном эксперименте происходит при постоянной значении окружной скорости воздуха  $w_{\text{в}}$  только за счет увеличения диаметра топливного сопла, то в этом случае создается впечатление, что снижение скорости вылета топлива  $u_{\text{т}}$  приводит к укорачиванию закрученного факела,

При дальнейшем увеличении степени крутки длина факела снижается в меньшей мере и постепенно приходит к некоторой минимальной величине, зависящей от угла наклона направляющих лопаток. Форма факела вблизи минимума его длины представлена на рис. 5. Во всех трех случаях образуется широкий факел (см. рис. 5, а, б, в), хорошо заполняющий поперечное сечение топки. Минимальную длину имеет факел при угле закрутки  $45^\circ$  (см. рис. 5, в).

Таким образом, выявлены сложные количественные закономерности влияния крутки на длину и форму диффузионного факела в вертикальной топке. Как показало исследование режимов теплообмена [4], короткий диффузионный факел, закрученный направляющими лопатками под углом  $45^\circ$ , обеспечивает требуемую интенсивность охлаждения продуктов горения природного газа в топке водонагревателя.

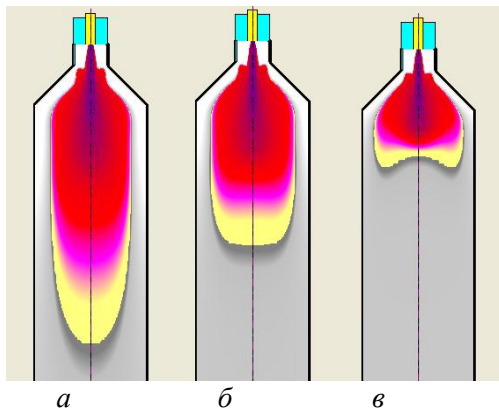


Рис. 5. Форма закрученного факела в области его минимальной длины при угле наклона направляющих лопаток:  
 $a - 20^\circ$ ,  $b - 30^\circ$ ,  $c - 45^\circ$

#### Выводы

1. Выполнено численное исследование горения природного газа в прямоточном диффузионном факеле в вертикальной цилиндрической топке при наличии выталкивающей силы, подтвердившее адекватность математической модели.

2. Получены новые количественные закономерности, раскрывающие сложный характер влияния крутки потока воздуха на горение природного газа в вертикальном закрученном факеле.

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Трубаев П.А., Кузнецов В.А., Беседин П.В. Методы компьютерного моделирования горения и теплообмена во вращающихся печах. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2008. – 230 с.
2. Семикин И.Д., Аверин С.И., Радченко И.И. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов. – М.: Металлургия, 1965. – 392 с.
3. Губарев А.В., Кулешов М.И. Варианты компоновки радиационной части конденсационного водогрейного котла // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 1. – С. 182–184.
4. Сухорослова В.В., Кузнецов В.А. Результаты численного моделирования горения и теплообмена в топке водонагревателя // Энергетика и энергоэффективные технологии: межвуз. сб. статей. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – Вып.1. Часть 2. – С. 138 – 142.