

Горение природного газа в вертикальном факеле

Кузнецов В. А., доктор техн. наук, Альмохаммед О. А., магистр

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

Численными методами моделирования исследованы закономерности горения природного газа в вертикальном, направленном вниз диффузионном факеле. Выявлены сложные количественные зависимости длины и формы факела от скорости вылета природного газа из сопла горелки и от крутки воздуха, подаваемого на горение. Отмечено значительное воздействие на факел выталкивающей силы, возникающей в неизотермической газообразной среде.

Ключевые слова: природный газ, диффузионное горение, вертикальный факел, выталкивающая сила, крутка воздуха, компьютерное моделирование.

Исследование закономерностей горения газообразного топлива в турбулентном диффузионном факеле необходимо для правильной организации теплотехнологических процессов в промышленных печах. Продолжительность диффузионного горения определяется интенсивностью турбулентного смешения топлива с воздухом, она практически не зависит от интенсивности химических реакций, скорость протекания которых условно принимается бесконечно большой. Несмотря на это допущение, изучение диффузионного горения связано со значительными затруднениями как теоретического, так и экспериментального плана, особенно при воздействии на факел выталкивающей силы.

В настоящее время известны основные закономерности диффузионного горения газообразного топлива в горизонтальном факеле в случае, когда влиянием выталкивающей силы можно пренебречь. Например, в [1] для оценки длины горизонтального диффузионного факела l_{Φ} приведена формула, которая учитывает влияние как теплотехнических характеристик топлива, так и аэродинамики свободной турбулентной струи:

$$\frac{l_{\Phi}}{d_0} = 3,1 \left[\frac{n_{\text{в}} + 1}{1,31} (2Sc_{\text{T}} + 1) - 1 \right] \sqrt{\frac{\rho_0}{\bar{\rho}}}, \quad (1)$$

где d_0 — диаметр отверстия топливного сопла; $n_{\text{в}}$ — стехиометрическое массовое соотношение воздуха и топлива при горении; $Sc_{\text{T}} \approx 0,8 \div 0,85$ — турбулентное число Шмидта; ρ_0 — плотность топлива; $\bar{\rho}$ — средняя плотность газообразной среды в факеле.

В том случае, когда правая часть формулы (1) постоянна, длина факела оказывается пропорциональной диаметру сопла, а относительная длина факела l_{Φ}/d_0 согласно экспериментальным данным [2] не зависит от расхода топлива. Если же при этом температура горения и, следовательно, средняя плотность газообразной среды $\bar{\rho}$ изменяются, то относительная длина горизонтального диффузионного факела l_{Φ}/d_0 несколько возрастает при

увеличении расхода топлива и, наоборот, уменьшается при снижении его расхода.

На горение природного газа в направленном вниз вертикальном факеле большое воздействие оказывает подъемная (выталкивающая) сила, возникающая в неизотермической среде. Ее влияние обычно учитывается с помощью числа подобия Фруда

$$Fr = u_0^2 / (d_0 g),$$

где u_0 — скорость вылета топлива из сопла горелки; g — ускорение свободного падения.

Согласно данным экспериментов [3] относительная длина вертикального факела l_{Φ}/d_0 коксовального газа оказалась пропорциональной числу Фруда в степени 0,17. По другим данным [4] показатель степени при числе Фруда имеет меньшие значения: 0,125 — при горении московского городского газа и 0,165 — при горении пропана. В соответствии с [5] относительная длина вертикального факела при постоянном расходе газообразного топлива зависит от числа Фруда в степени 0,2. На протяжении многих лет эти экспериментальные результаты оставались без уточнений, а теория диффузионного горения в большинстве случаев излагалась на описательном уровне без достаточного математического и расчетного обоснования. Формула из [4] приводится в некоторых учебниках и справочниках, как правило, без разъяснения специфических условий ее применения.

Современные вычислительные методы позволяют изучать горение природного газа с помощью компьютерного моделирования процессов тепломассопереноса при турбулентном движении газообразной среды. В математической модели дифференциальные уравнения адекватно описывают всю совокупность взаимодействующих факторов, влияющих на горение, — турбулентное движение топлива, воздуха и продуктов горения, их смешение в диффузионном факеле, тепловыделение при протекании реакций горения на фронте пламени, радиационно-конвективный теплоперенос.

Компьютерная программа, разработанная по математической модели, позволила осуществить серию вычислительных экспериментов для изучения условий горения природного газа и теплообмена в вертикальной топке водонагревателя при номинальном расходе природного газа $V_{\text{ном}} = 24 \text{ м}^3/\text{ч}$ с теплотой сгорания $35\,975 \text{ кДж}/\text{м}^3$ при коэффициенте избытка воздуха 1,1. Над цилиндрической топкой диаметром 510 мм установлено горелочное устройство, включающее в себя два коаксиальных канала для подачи первичного (10 % общего объема) и вторичного воздуха. Природный газ подается из сопла горелки вниз по оси центрального канала, вовлекает первичный воздух в струйное течение и смешивается с вторичным воздухом, образуя вертикальный факел. Диаметр сопел горелки находится в диапазоне от 5 до 26 мм. Скорость вылета природного газа при постоянном его расходе зависит от диаметра топливного сопла и при его увеличении снижается более чем на порядок — от 340 до 12,6 м/с. Вторичный воздух выходит в топку со скоростью 14,8 м/с из кольцевого канала шириной по радиусу 10 мм.

При численном решении задачи топку делили на контрольные объемы неравномерной расчетной сеткой таким образом, что по ее длине выделялось до 190 расчетных слоев, а по радиусу — до 60. Кольцевой воздушный канал имел по радиусу два расчетных слоя толщиной 5 мм каждый. Решая с помощью компьютерной программы систему дискретных алгебраических аналогов дифференциальных уравнений, получили значения компонент скорости, давления, температуры, концентраций топлива и воздуха в каждом узле сетки.

Как показали результаты расчетов (кривая 3 на рис. 1), при постоянном расходе топлива отношение длины вертикального прямого факела к диаметру сопла $l_{\text{ф}}/d_0$ возрастает с увеличением числа Фруда, так что на кривой 3 можно выделить по крайней мере два участка, показанные сплошными и штрихпунктирными линиями. Участок при низких значениях числа Фруда описывается уравнением, показатель степени в котором близок к значению 0,2:

$$l_{\text{ф}}/d_0 = 21,8 \text{Fr}^{0,2}.$$

Поскольку при постоянном расходе топлива число Фруда обратно пропорционально диаметру сопла d_0 в пятой степени, то в этом случае длина вертикального факела $l_{\text{ф}}$ после возведения в степень 0,2 не должна зависеть от d_0 . Действительно, численное моделирование показало, что если значение d_0 превышает 14 мм, то при дальнейшем его

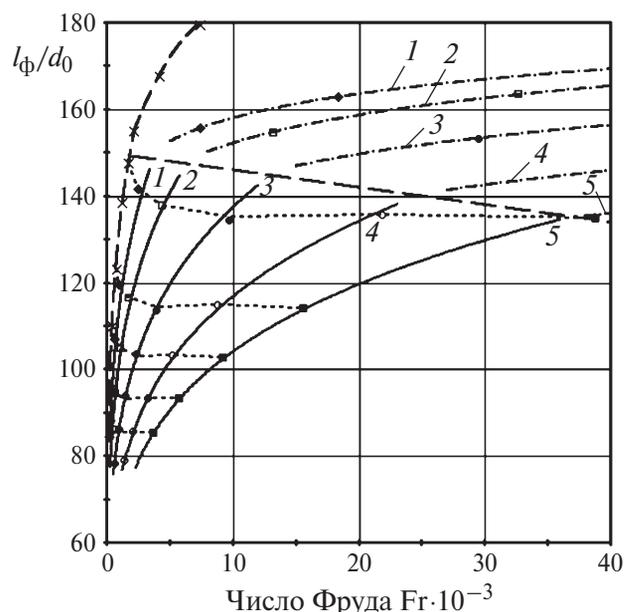


Рис. 1. Зависимости относительной длины факела $l_{\text{ф}}/d_0$ от числа Фруда:

сплошные и штрихпунктирные линии — при постоянном расходе топлива (1 — $12 \text{ м}^3/\text{ч}$, 2 — 16 , 3 — 24 , 4 — 36 , 5 — $48 \text{ м}^3/\text{ч}$); пунктирные линии — при постоянном диаметре топливного сопла d_0

увеличению изменением длины факела можно пренебречь.

Следует отметить, что скорость вылета топлива u_0 зависит не только от диаметра сопла, но и от расхода топлива. Если предположить, что изменение расхода топлива при постоянном диаметре сопла, как и в формуле (1), не приводит к изменению длины факела, то, введя в число Фруда соотношение объемных расходов топлива $V/V_{\text{ном}}$ вместо соотношения скоростей, получим приближенную обобщающую формулу для относительной длины факела в рассматриваемой области:

$$l_{\text{ф}}/d_0 \approx 21,8 (V/V_{\text{ном}})^{-0,4} \text{Fr}^{0,2}. \quad (2)$$

При обобщении данных, полученных в [6], для проверки формулы (2) проведены дополнительные численные эксперименты при расходе природного газа $V = 12, 16, 36$ и $48 \text{ м}^3/\text{ч}$, результаты которых представлены на рис. 1 для разных расходов топлива сплошными линиями.

Полученная в численных экспериментах зависимость относительной длины факела $l_{\text{ф}}/d_0$ от числа Фруда при переменном расходе топлива, но при сохранении постоянным диаметра сопла представлена на рис. 1 пунктирными линиями. Она показывает, что в этих условиях при номинальном и более высоких расходах топлива (кривые 3–5 на рис. 1) относительная длина факела остается примерно постоянной и в целом соответствует обобщающей формуле (2). При понижен-

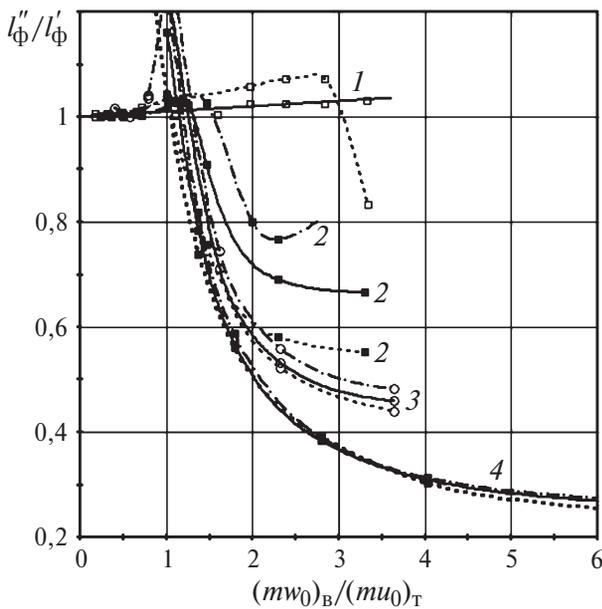


Рис. 2. Зависимости отношения длин закрученного l''_{ϕ} и прямого l'_{ϕ} факелов от относительного импульса крутки воздуха $(mw_0)_B / (mu_0)_T$:

1 – 4 – при угле наклона лопаток 10, 20, 30, 45° и расходе топлива 12 м³/ч (пунктирные линии); 24 м³/ч (сплошные линии) и 48 м³/ч (штрихпунктирные линии)

ном расходе топлива (кривые 1 и 2 на рис. 1) точки, определенные в численном эксперименте, лежат несколько выше значений, рассчитанных по формуле (2), причем отклонение происходит в сторону, противоположную той, что предсказывается формулой (1). В результате относительная длина факела достигает максимума на штриховой линии (слева на рис. 1), для точек которой подобрано уравнение

$$l_{\phi} / d_0 = 33,34Fr^{0,2}.$$

Такого рода аномальное отклонение точек, полученных в численном эксперименте, от обобщающей формулы (2) объясняется своеобразием воздействия выталкивающей силы на низкоскоростной диффузионный факел.

Рассмотренная область закономерного воздействия выталкивающей силы на вертикальный диффузионный факел ограничена на рис. 1 сверху штриховой прямой линией, приближенно задаваемой уравнением

$$l_{\phi} / d_0 = 150 - 0,0004Fr.$$

Участки кривых, представленные на рис. 1 штрихпунктирными линиями, занимают область более высоких значений числа Фруда и описываются уравнениями с показателем степени, меньшим 0,2. Они создают плавный переход к зависимости, соответствующей формуле (1), где влияние подъемной силы практически не проявляется. Наличие переходных условий горения природного газа в

вертикальном факеле позволяет объяснить большой разброс в оценке закономерностей изменения его длины по результатам экспериментов [3 – 5].

Для оценки влияния крутки вторичного воздуха на длину и форму вертикального диффузионного факела выполнена серия численных экспериментов при углах наклона к вертикали от 10 до 45° направляющих лопаток, придающих воздуху в выходном канале окружную скорость w_0 . Результаты численных исследований при номинальном расходе топлива 24 м³/ч приведены на рис. 2 для четырех углов наклона направляющих лопаток (10, 20, 30 и 45°) в виде сплошных линий, представляющих отношение длин закрученного и прямого факелов l''_{ϕ} / l'_{ϕ} в зависимости от относительного импульса крутки, т. е. от отношения потоков количества движения $(mw_0)_B / (mu_0)_T$ — окружного при подаче вторичного воздуха и вертикального при вылете топлива из сопла горелки.

Было выявлено, что при угле наклона лопаток 10° длина факела мало зависит от степени крутки. В этих условиях при возрастании относительной крутки факел не только не укорачивается, а даже немного удлиняется (примерно на 2%), как показывает кривая 1 на рис. 2. Та же зависимость сохраняется и при других углах наклона лопаток в области малых значений относительной крутки при $(mw_0)_B / (mu_0)_T \ll 1$. Более того, в области примерно равных импульсов крутки воздуха и вылета топлива, т. е. при $(mw_0)_B \approx (mu_0)_T$ проявляется тенденция к резкому возрастанию длины закрученного факела в 1,2 – 1,6 раза с последующим переходом к укорочению факела при повышении относительной крутки (см. кривые 2 – 4 на рис. 2).

В области изменения относительного импульса крутки от 1,2 до 2 происходит резкое уменьшение длины диффузионного факела, а в приосевой области топки под факелом возникает возвратное движение газов, создающее в какой-то мере циклонный эффект. Поскольку в численном эксперименте возрастание относительной крутки происходит при постоянном значении окружной скорости воздуха w_0 только за счет увеличения диаметра топливного сопла, создается впечатление, что уменьшение скорости вылета топлива u_0 приводит к укорачиванию закрученного факела. При дальнейшем увеличении степени крутки в случае сохранения неизменным угла наклона лопаток длина факела снижается в меньшей мере и постепенно приходит к некоторой минимальной величине, зависящей от угла крутки (см. рис. 2).

Представляется интересным и полезным исследовать, как изменится воздействие от-

носительной крутки потока воздуха на вертикальный факел при увеличении или уменьшении расхода сжигаемого природного газа, если остальные условия горения оставить теми же. Результаты численного моделирования представлены на рис. 2 пунктирными и штрихпунктирными линиями при расходе топлива соответственно 12 и 48 м³/ч. Они показывают, что при больших углах наклона направляющих лопаток к вертикали (30 и 45°) кривые 3 и 4, характеризующие уменьшение длины факела с усилением крутки, мало зависят от расхода топлива. Но при небольших углах наклона направляющих лопаток (10 и 20°) расход природного газа оказывает весьма существенное влияние на длину закрученного факела.

При угле наклона направляющих лопаток 20° к вертикали уменьшение расхода топлива приводит к образованию более короткого факела, а при повышенном расходе топлива закрученный факел заметно удлиняется (см. пунктирную и штрихпунктирную линии 2 на рис. 2). При направляющих лопатках, наклоненных на 10° к вертикали, уменьшение расхода топлива до 12 м³/ч приводит сначала к небольшому удлинению факела, затем относительная длина факела резко уменьшается (пунктирная линия 1 на рис. 2).

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 в факеле. Таким способом может быть наглядно изображен факел горящего природного газа в вертикальной топке.

На рис. 3 показаны четыре вертикальных факела, образовавшихся при расходе 24 м³/ч природного газа из сопел диаметром от 8 до 18 мм. Первый факел на рис. 3, а — прямооточный, а второй — на рис. 3, б закручен под углом 30° при относительном импульсе крутки $(mw_0)_в / (mu_0)_т \approx 1$. Прямоточный факел сконцентрирован в узкой области вдоль оси топки, тогда как закрученный факел заметно расширен относительно оси топки и удлинен. Таким образом, увеличение относительного импульса крутки воздуха приводит в этой области к неожиданному эффекту: факел не только не укорачивается, а как бы “разбухает” и удлиняется. Затем с увеличением крутки факел становится короче.

Различные формы закрученного факела наблюдаются вблизи минимума его длины при углах наклона направляющих лопаток 30 и 45°. Как показано на рис. 3, в и г, в обоих случаях образуется широкий факел, хорошо заполняющий поперечное сечение топки, но

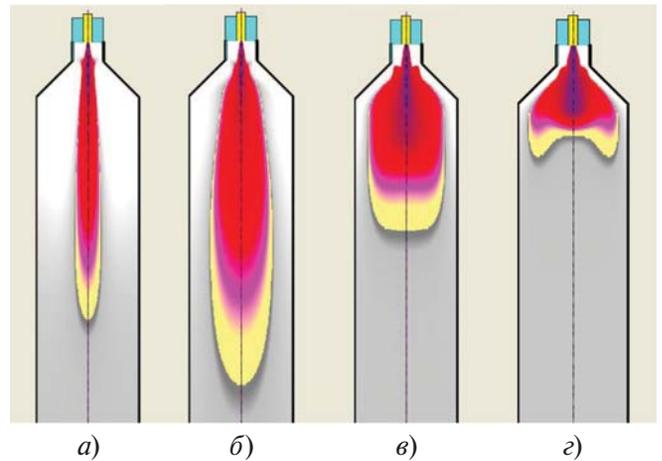


Рис. 3. Внешний вид (форма) прямооточного (а) и закрученного (б–г) факелов:

угол наклона лопаток 30° (б и в) и 45° (г); относительный импульс крутки примерно равен единице (б) и значительно больше единицы (в, г)

минимальную длину и своеобразную серповидную форму факел приобретает при угле закрутки 45° (см. рис. 3, г).

Таким образом, численное компьютерное моделирование позволило выявить сложные количественные закономерности влияния скорости вылета природного газа и крутки воздуха на длину и форму вертикального диффузионного факела. Как показало исследование режимов теплообмена, короткий диффузионный факел, закрученный направляющими лопатками под углом 45°, обеспечивает требуемую интенсивность охлаждения продуктов горения природного газа в топке водонагревателя.

Список литературы

1. Трубаев П. А., Кузнецов В. А., Беседин П. В. Методы компьютерного моделирования горения и теплообмена во вращающихся печах. — Белгород: Изд-во БГТУ, 2008.
2. Hawthorne W. R., Weddell D. S., Hottell H. C. Mixing and combustion in turbulent gas jets. — Third symposium on combustion and flame and explosion phenomena. Baltimore, 1949.
3. Левченко П. В., Китаев Б. И. Основные закономерности газового факела. — Сталь, 1952, № 3.
4. Шорин С. Н., Ермолаев О. Н. Характеристики горения и радиации турбулентного газового факела. — Теплоэнергетика, 1959, № 2.
5. Семикин И. Д., Аверин С. И., Радченко И. И. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов. — М.: Металлургия, 1965.
6. Альмохаммед О. А., Кузнецов В. А. Численное исследование закономерностей горения природного газа в вертикальной топке. — Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова, 2013, № 2.